

MARLOS PEDRO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE JUNTAS OBTIDAS PELO PROCESSO  
FTPW EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2017**

MARLOS PEDRO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE JUNTAS OBTIDAS PELO PROCESSO  
FTPW EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador(es): Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco e Msc. Raphael Rezende Pires.

UBERLÂNDIA – MG  
2017

MARLOS PEDRO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE JUNTAS OBTIDAS PELO PROCESSO  
FTPW EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX**

**Projeto de fim de curso** apresentado  
ao curso de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de **Engenheiro  
Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e  
Processos de Fabricação.

---

Prof. Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Luciano José Arantes  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Msc. Rafael Ariza Gonçalves  
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, que está sempre a frente dos meus passos, me fortalecendo e capacitando.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao professor Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco pela oportunidade, apoio e orientação neste trabalho.

Aos professores Dr. Luciano José Arantes e Msc. Rafael Ariza Gonçalves pelo paciente trabalho de revisão da redação, suas correções e incentivos.

Ao Engenheiro Raphael Rezende Pires e o técnico Flávio Alves pela disposição e auxílio durante aos ensaios realizados e nas discussões dos resultados.

À UFU e ao LTAD pela excelente infraestrutura laboratorial, que proporcionou a realização deste trabalho.

À Petrobras, por todo investimento em pesquisa e desenvolvimento, especialmente por possibilitar a execução deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RODRIGUES, M. P. **AVALIAÇÃO DE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS OBTIDAS PELO PROCESSO FTPW EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX.** . 2017. 76 p. TCC – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo caracterizar microestruturalmente a solda em tubo utilizando a técnica de soldagem por atrito FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*). Para o estudo em questão foi escolhido soldar um tubo de aço inoxidável duplex UNS S32205 com pino consumível de mesmo material. O estudo foi realizado por meio da análise da seção longitudinal das soldas. Foram executadas análises do ciclo térmico de soldagem; avaliações de macro e microestrutura juntamente com a quantificação de fases; assim como ensaios de dureza, microdureza, tração e dobramento. As fotomicrografias não mostraram falhas e defeitos de preenchimento, indicando que os parâmetros de ensaio foram adequados. Ao longo da junta soldada, existe uma variação da microestrutura nas regiões analisadas, composta por uma matriz ferrítica, e austenita com diferentes morfologias ( intragranular, alotriomórfica, parcialmente transformada, primária, secundária, e placas de Widmanstätten). Referente à metalografia quantitativa, existe um gradiente no desbalanço de fases com aumento da fase ferrítica na zona de processamento do pino. Houve uma variação pouco significativa das propriedades mecânicas (limite de resistência à tração e limite de escoamento) ao longo da profundidade da solda. Nas análises de macrodureza e microdureza, foi observado um gradiente nas durezas, com valores mais altos na zona de processamento do pino. Todas as juntas foram dobradas à 180°, sem ocorrer a formação de trincas, comprovando a ductilidade da junta soldada.

**Palavras chave:** FTPW, aço inoxidável duplex, microestrutura, propriedades mecânicas.

RODRIGUES, M. P. **MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FTPW JOINTS IN STAINLESS STEEL DUPLEX**. 2017. 76 p. Course completion work, School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia/Brazil.

## **Abstract**

The objective of this work was to characterize the microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel welded joints produced by FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*). In this study, it was used pipes made of duplex stainless steel UNS S32205. The pins used to fill the cavities were of the same material. The macro and microstructure were analyzed in longitudinal sections of the welds and the volumetric percentage of each phase was measured using quantitative metallography. The mechanical properties were evaluated by means of hardness, tensile and bending tests. The selected welding parameters produced joints without any significant defect. Along the welding interface between the added pin and the substrate, the microstructure was mainly ferrite and austenite of varying morphologies, such as intragranular, allotriomorphic, partial transformed, primary, secondary and Widmanstätten plates. At the thermo-mechanically processed interface a higher percentage of  $\delta$ -ferrite was observed. The tensile tests did not show any significant variation of the mechanical properties (yield and tensile strength) along the weld joint depth. However, the hardness profiles showed higher hardness values at the thermo-mechanically processed interface. Despite of this, all specimens were bended by 180° without any crack formation.

**Keywords:** FTPW, duplex stainless steel, microstructure, mechanical properties.

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$\delta$	Fase ferrita
$\gamma$	Fase austenita
$\gamma_1$	Austenita primária
$\gamma_2$	Austenita secundária
$\gamma$ alotriomórfica	Austenita alotriomórfica
$\gamma$ intragranular	Austenita intragranular
$\gamma_{pt}$	Austenita parcialmente transformada
$\gamma$ Widmanstätten	Placas de Widmanstätten
$A$	Raio do êmbolo
Eq.	Equação
Cr	Cromo
$e$	Alongamento percentual na superfície externa da amostra
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
$T$	Espessura da amostra
T1, T2, T3, T4	Nomenclatura dos termopares
Al	Aços Inoxidáveis
AID	Aços Inoxidáveis Duplex
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CP's	Corpos de Prova
CST	Corrosão sob tensão
FTPW	<i>Friction Tapered Plug Welding</i>
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/ Metal Active Gas</i>
PRE	<i>Pitting Resistance Equivalent</i>
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i>
UPPA X	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termo Mecanicamente Afetada



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Propriedades mecânicas entre classes de aços inoxidáveis e outros metais (MEINDHART, 2013)	4
<b>Figura 2:</b> Diferentes tipos de aços inoxidáveis (SABARA, 2013)	5
<b>Figura 3:</b> Comparação de propriedades mecânicas entre diferentes classes de Al (MEINDHART, 2013)	7
<b>Figura 4:</b> Desenho esquemático do processo de soldagem por atrito convencional (AWS1991 e PINHEIRO 2008): a) Rotação de uma das peças; b) Aplicação da Força de Compressão; c) Início da soldagem; d) Fim da soldagem.	8
<b>Figura 5:</b> Etapas do processo FTPW	9
<b>Figura 6:</b> Ilustração das zonas afetadas pelo processamento observadas em uma junta soldada. Adaptado de Meinhardt (2013)	10
<b>Figura 7:</b> Unidade de Processamento Pinos por Atrito X (RODRIGUES, 2016)	12
<b>Figura 8:</b> Cilindro de reparo (RODRIGUES, 2016)	12
<b>Figura 9:</b> Ilustração da remoção de amostra (metal base) a partir de um tubo	14
<b>Figura 10:</b> (a) e (b) Microestrutura da seção transversal da <b>barra</b> para fabricação dos pinos em AID, imagens com aumentos diferentes; (c) e (d) microestrutura da seção longitudinal da barra para fabricação dos pinos em AID, imagens com aumentos diferentes (HNO <sub>3</sub> eletrolítico)	15
<b>Figura 11:</b> (a) e (b) Microestrutura da seção transversal do <b>tubo</b> para fabricação do metal base em AID, imagens com aumentos diferentes; (c) e (d) microestrutura da seção longitudinal da tubo para fabricação do metal base em AID, imagens com aumentos diferentes (HNO <sub>3</sub> eletrolítico)	16
<b>Figura 12:</b> Geometrias dos materiais confeccionados para os ensaios	18
<b>Figura 13:</b> (a) pino (b) metal base	19
<b>Figura 14:</b> Geometria do metal base, com cavidades para inserção dos termopares Dimensões em milímetros	19
<b>Figura 15:</b> Posicionamento dos termopares no metal de base	20
<b>Figura 16:</b> (a) Representação esquemática de medição do ciclo térmico e (b) sistema real	20
<b>Figura 17:</b> Microscópio óptico utilizado para aquisição de imagens nas etapas de micrografia e metalografia quantitativa	22
<b>Figura 18:</b> Mapa de identificação das posições de investigação da microestrutura	23
<b>Figura 19:</b> Ilustração do procedimento de aquisição de imagens para quantificação	

volumétrica de fases	24
<b>Figura 20:</b> Posicionamento dos perfis de dureza (macro)	25
<b>Figura 21:</b> Mapa de microdureza	26
<b>Figura 22:</b> (a) Microdurômetro (b) Amostra posicionada sobre a mesa	27
<b>Figura 23:</b> Ilustração da obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração (FRANCO, 2017)	28
<b>Figura 24:</b> Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, segundo norma ASTM E8/E8M-15a (2016)	28
<b>Figura 25:</b> Corpos de prova para ensaio de tração	29
<b>Figura 26:</b> Máquina utilizada para realizar ensaio de tração	30
<b>Figura 27:</b> (a) posicionamento da amostra entre as garras e (b) acoplamento do extensômetro no corpo de prova	30
<b>Figura 28:</b> Ilustração da obtenção do corpo de prova para ensaio de dobramento em uma junta soldada (FRANCO, 2017)	31
<b>Figura 29:</b> Corpos de prova antes do ensaio de dobramento	31
<b>Figura 30:</b> (a) Máquina utilizada para execução do ensaio de dobramento, (b) corpo de prova posicionado sobre os roletes	32
<b>Figura 31:</b> Gráfico de processamento da junta soldada (30 kN, profundidade do furo de 16 mm)	33
<b>Figura 32:</b> Gráfico de temperatura em função do tempo da junta soldada (30 kN profundidade do furo 16mm)	34
<b>Figura 33:</b> Macrografia da junta soldada	35
<b>Figura 34:</b> Regiões analisadas na macrografia	36
<b>Figura 35:</b> (a) Microestrutura da junta soldada na posição de análise A; (b) imagem anterior com maior aumento	38
<b>Figura 36:</b> Diagrama pseudobinário Fe-[Cr/Ni]eq. (VASCONCELLOS; ROSENTHAL; PARANHOS, 2010)	38
<b>Figura 37:</b> Microestrutura da junta soldada na posição de análise B; (b) imagem anterior com maior aumento	39
<b>Figura 38:</b> Microestrutura da junta soldada na posição de análise C; (b) imagem anterior com maior aumento	40
<b>Figura 39:</b> Microestrutura da junta soldada na posição de análise D; (b) imagem anterior com maior aumento	40
<b>Figura 40:</b> Microestrutura da junta soldada na posição de análise E; (b) imagem anterior com maior aumento	41
<b>Figura 41:</b> Microestrutura da junta soldada na posição de análise F; (b) imagem	

anterior com maior aumento _____	41
<b>Figura 42:</b> Conjunto de imagens obtidas para realização de metalografia quantitativa, eixos indicando posição em [mm] _____	42
<b>Figura 43:</b> Fração volumétrica de fases da junta soldada _____	43
<b>Figura 44:</b> (a) Região cisalhada do pino, (b) microestrutura na região cisalhada, com 55 % de ferrita _____	44
<b>Figura 45:</b> Perfil de dureza vertical _____	45
<b>Figura 46:</b> Perfil de dureza horizontal a 3 mm _____	45
<b>Figura 47:</b> Perfil de dureza horizontal a 7 mm _____	46
<b>Figura 48:</b> Início dos perfis de dureza horizontais _____	47
<b>Figura 49:</b> Mapa de microdureza _____	48
<b>Figura 50:</b> Curvas tensão x deformação _____	49
<b>Figura 51:</b> Corpos de prova após ensaio de tração, com marcações indicando o local da fratura _____	50
<b>Figura 52:</b> Seções transversais das amostras analisadas em MEV _____	51
<b>Figura 53:</b> Nucleação e crescimento das microcavidades no material _____	52
<b>Figura 54:</b> Curvas do ensaio de dobramento _____	52
<b>Figura 55:</b> (a) Perda de material do rolete, (b) material do rolete aderido ao corpo de prova _____	53
<b>Figura 56:</b> Corpos de prova após ensaio de dobramento (a) n°1, (b) n°2 e (c) n°3 _____	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, duplex e superduplex. Adaptado de Loureiro (2010). Na tabela abaixo, tem-se: Limite de escoamento, limite de resistência a tração e valores de dureza _____	6
<b>Tabela 2:</b> Capacidade máxima operacional da UPPA X (RODRIGUES, 2011) _____	13
<b>Tabela 3:</b> Composição química dos materiais utilizados para fabricação do metal base e do pino (% em peso). _____	14
<b>Tabela 4:</b> Frações volumétricas da fase ferrita medidas nas seções transversais e longitudinais da barra e do tubo em AID no estado como fornecido _____	17
<b>Tabela 5:</b> Matriz de ensaio _____	17
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros de ensaio para soldagem <i>FTPW</i> _____	17
<b>Tabela 7:</b> Propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados _____	50

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos e estruturação	2
<b>CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1. Aços Inoxidáveis	4
2.2. Aços Inoxidáveis Duplex	5
2.3. Processo de Soldagem por Atrito	8
<b>CAPÍTULO 3- Procedimento experimental</b>	<b>11</b>
3.1. Descrição do Equipamento de Soldagem por Atrito FTPW	11
3.2. Materiais Empregados nas Juntas Soldadas	13
3.3. Parâmetros do Processo de Soldagem	17
3.4. Medição do Ciclo Térmico de Soldagem	19
3.5. Análise da Macroestrutura e Microestrutura	21
3.5.1. Macrografia	21
3.5.2. Micrografia	21
3.5.3. Quantificação Volumétrica das Fases Ferrítica e Austenítica	23
3.6. Ensaio de Dureza Vickers	25
3.6.1. Macro dureza	25
3.6.2. Micro dureza	25
3.7. Ensaio de Tração	27
3.8. Ensaio de Dobramento	30
<b>CAPÍTULO 4 - Resultados e discussões</b>	<b>33</b>
4.1. Análise de Sinais do Processo de Soldagem FTPW	33
4.2. Tratamento e Análise dos Sinais Adquiridos de Temperatura	34
4.3. Caracterização Metalúrgica das Juntas Soldadas	35
4.3.1. Macrografia	35
4.3.2. Micrografia	37
4.3.3. Quantificação Volumétrica das Fases Ferrítica e Austenítica	41
4.4. Ensaio de Dureza Vickers	44

4.4.1.	<i>Macro dureza</i>	44
4.4.2.	<i>Micro dureza</i>	47
4.5.	Ensaio de Tração	49
4.6.	Ensaio de Dobramento	52
<b>CAPÍTULO 5 - Conclusões</b>		<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 6 - Referencias bibliográficas</b>		<b>58</b>
<b>APÊNDICE</b>		<b>61</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Alguns equipamentos mecânicos, como tubulações e estruturas de plataformas de petróleo estão sujeitos à nucleação e propagação de trincas, o que pode gerar danos, tais como acidentes e enormes perdas financeiras. Para evitar esses danos, reparos são realizados, na maioria das vezes, pela soldagem a arco elétrico. Os processos convencionais de soldagem (eletrodo revestido, MIG/MAG, TIG, eletrodo tubular), podem apresentar problemas de natureza metalúrgica como inclusão de escória, fragilização por hidrogênio difusível, trincas de solidificação, porosidades no cordão de solda, formação de fases frágeis nas zonas termicamente afetadas. Com o intuito de minimizar e evitar esses problemas, foi desenvolvido uma nova técnica de reparo, denominado soldagem por atrito.

A técnica de soldagem por atrito é um processo que ocorre totalmente no estado sólido, o qual impede o surgimento de problemas devido adsorção de gases, que causam trincas e poros nos cordões de solda. Além disso, a temperatura atingida durante o processo é abaixo da temperatura de fusão dos materiais envolvidos, que elimina os defeitos de solidificação. Nesta técnica, é desnecessária a utilização de metal de adição, fluxo e/ou gás protetor, que resulta na ausência de fumos. E mais, a soldagem por atrito possibilita a união de materiais dissimilares, de difícil ou até mesmo impossíveis de serem soldados por outros processos, além de promover soldas com formação de uma estreita ZTA (Zona Termicamente Afetada) (RODRIGUES, 2016).

A soldagem por atrito, portanto, quando comparada com a soldagem por arco voltaico apresenta melhorias na qualidade da solda, além de grande potencialidade de aplicação em sistemas com risco de explosão, como as verificadas em dutos, terminais de bombeamento e estocagem de petróleo (PIRES, 2007). Desta maneira, esta técnica de reparo se torna uma boa alternativa, em determinadas aplicações cuja soldagem convencional se encontra limitada.

Dentre as diferentes técnicas de reparo por atrito, destaca-se aqui o processamento por atrito de pinos em formato cônicos, denominada de FTPW (Friction Tapered Plug Welding), desenvolvidas em 1990 por Andrews e Mitchel (PIRES, 2007). Tal processo consiste no preenchimento de um furo não passante por intermédio da introdução de um

pino (consumível), estando este submetido a uma velocidade de rotação e esforços de compressão contra a cavidade do furo. Devido ao calor produzido na interface, ocorre a redução do limite de escoamento dos materiais envolvidos. Com o aumento da temperatura, o pino é mantido em uma condição viscoplástica, promovendo a formação de um fluxo plástico de material ao longo da interface (RODRIGUES, 2016). Além disso, uma das vantagens do processo FTPW consiste no efeito da pressão hidrostática não se apresentar como um fator limitante, como ocorre nas juntas soldadas a arco elétrico, de modo que a soldagem por atrito pode ser realizada dentro d'água em qualquer profundidade (RODRIGUES, 2016).

Pela importância da aplicação do aço inoxidável em estruturas offshore, e a necessidade de estudar a técnica FTPW para a solda em aço inoxidável duplex, este trabalho procurou contribuir no tema.

### **1.1. Objetivos e estruturação**

O objetivo do trabalho consiste em estudar a soldabilidade do aço inoxidável duplex ao utilizá-lo como material de base e pino consumível, aplicando a técnica de soldagem por atrito (FTPW) em tubos. A contribuição deste trabalho vem por meio das seguintes etapas realizadas: tratamento e análise dos sinais adquiridos dos parâmetros do processo e do ciclo térmico de soldagem; análise da macro e microestrutura; quantificação das fases na junta soldada; e avaliação detalhada da macro e microdureza, ensaios de tração e dobramento.

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, abrangendo a introdução no capítulo I.

No capítulo II, tem-se todo o desenvolvimento da revisão bibliográfica. Nesta parte é discorrido acerca dos aços inoxidáveis, com maior ênfase na classe dos aços inoxidáveis duplex, onde são mostrados os aspectos gerais relativos às suas características e propriedades mecânicas. Além disso, neste mesmo capítulo são apresentados os conceitos que abordam o processo de soldagem por atrito FTPW, bem como suas etapas e as microestruturas das juntas soldadas obtidas por meio deste processo.

O procedimento experimental por meio do qual foi desenvolvido todo o trabalho é apresentado no capítulo III, associado diretamente aos materiais, parâmetros de ensaio e recursos laboratoriais utilizados. Neste capítulo foi apresentada toda a metodologia para preparação das amostras, determinação das dimensões dos corpos de prova e realização dos ensaios.

No capítulo IV são descritos e discutidos todos os resultados obtidos a partir da



metodologia experimental citada anteriormente.

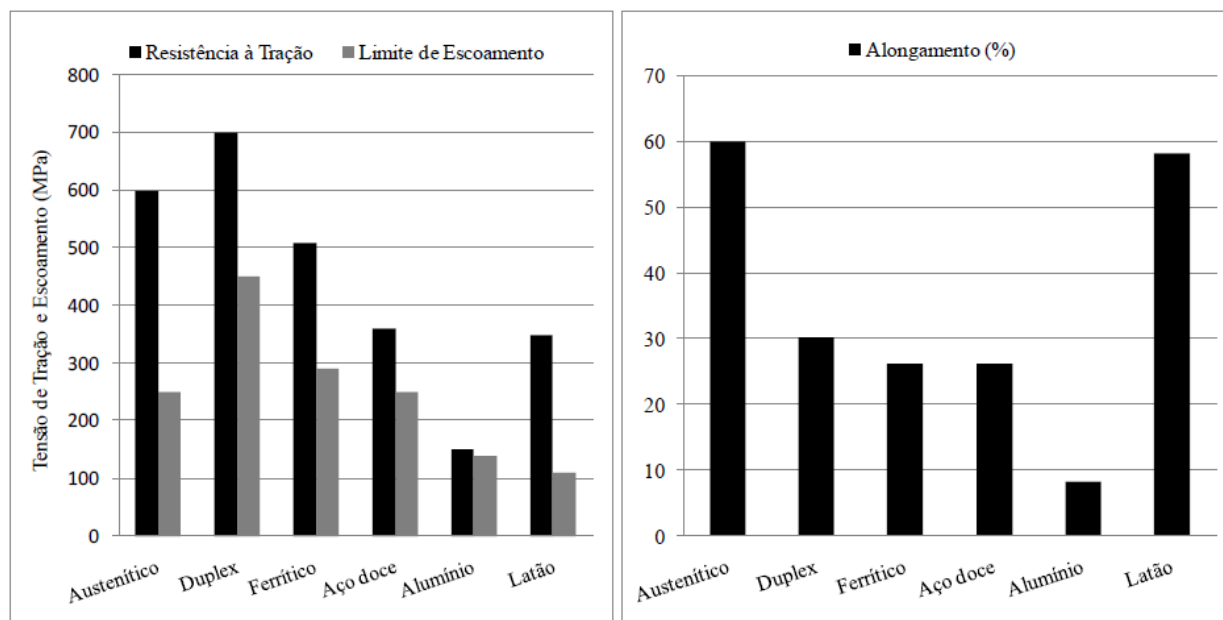
Por fim, no capítulo V são apresentadas as conclusões e sugestões para possíveis trabalhos futuros e em seguida, no capítulo VI são referenciadas as referências utilizadas.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis (AI) são ligas a base de ferro que contém no mínimo 11% de cromo (Cr), quantidade necessária para prevenir a corrosão do material em ambientes agressivos e em altas temperaturas (MEINDHART; SABARA, 2013). O cromo, em contato com o oxigênio, forma espontaneamente uma invisível e aderente película protetora. Além de resistência contra ataques corrosivos, os aços inoxidáveis aliam uma boa combinação de propriedades mecânicas como, resistência mecânica e ductilidade. A **Figura 1** mostra gráficos comparando propriedades mecânicas entre aços inoxidáveis e outros metais.

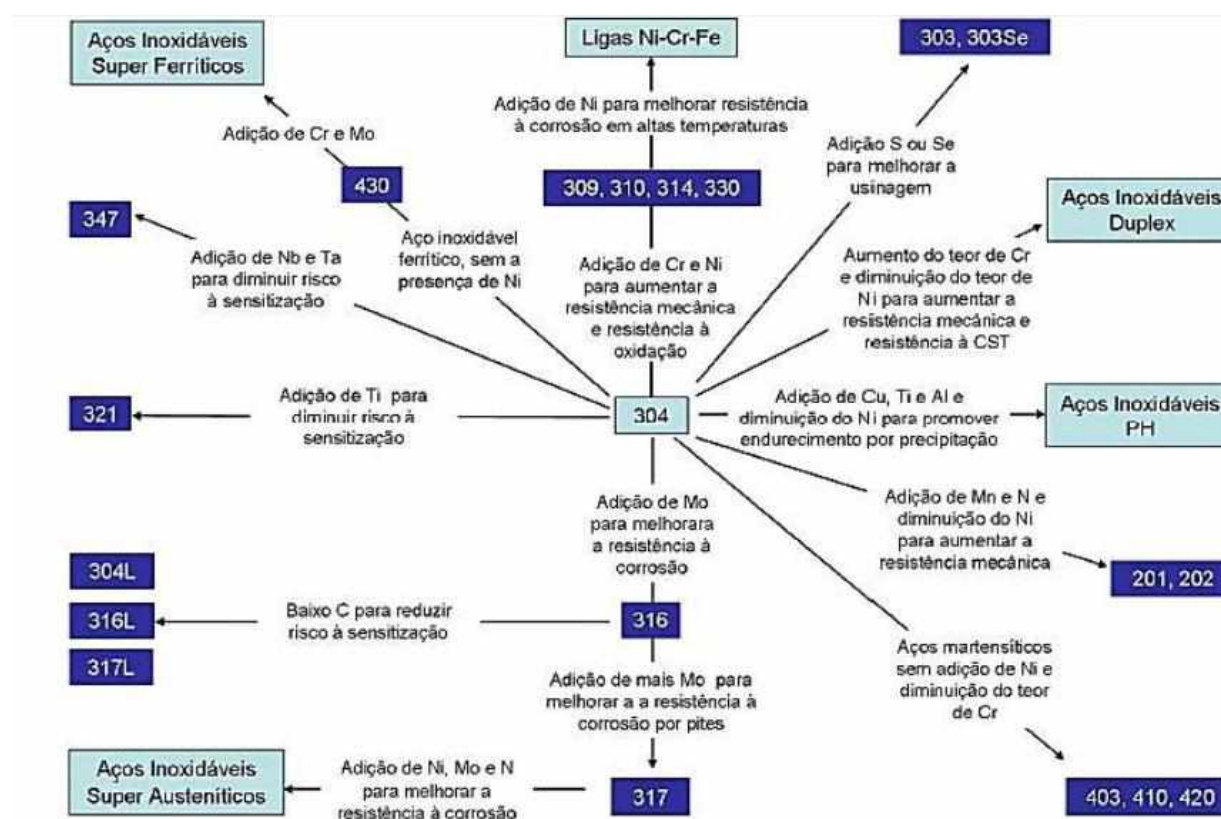


**Figura 1:** Propriedades mecânicas entre classes de aços inoxidáveis e outros metais (MEINDHART, 2013)

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos e classificados segundo sua microestrutura, podem ser: austeníticos, martensíticos, ferríticos, endurecíveis por precipitação e duplex (MEINDHART; SABARA, 2013). A adição de elementos possibilita

formar um vasto conjunto de materiais que possuem propriedades físico-químicas superiores às dos aços comuns.

Com intuito de promover características particulares, podem ser adicionados elementos como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, enxofre e selênio. O carbono se encontra normalmente presente em quantidades menores que 0,03% e até aproximadamente 1,0 % em certas classes martensíticas (MEINHARDT, 2013). Na **Figura 2** estão representados alguns aços inoxidáveis, suas respectivas composições e propriedades mecânicas.



**Figura 2:** Diferentes tipos de aços inoxidáveis (SABARA, 2013)

## 2.2. Aços Inoxidáveis Duplex

Dentre estas classes citadas, será discutido com maior ênfase neste trabalho, os aços inoxidáveis duplex (AID), cujo nome é dado à classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita, com frações volumétricas de, aproximadamente, 50% de cada fase (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007). O exato balanço entre cada fase provém da composição química, do histórico térmico e do trabalho mecânico realizado. Os elementos de liga principais presentes no AID são o cromo e o níquel. Além disso, a adição de nitrogênio, molibdênio, cobre, silício e tungstênio podem

auxiliar no controle do balanço microestrutural e promover características de resistência à corrosão (MEINDHART, 2013).

Os aços inoxidáveis duplex, quando comparados aos austeníticos, apresentam maior resistência à corrosão sob tensão e por pites, propriedade química quantificada empiricamente através da resistência equivalente à corrosão por pite, ou PRE (*Pitting Resistance Equivalent*). De acordo com a norma ASTM A890/A890M (1999), essa grandeza pode ser calculada segundo a **Eq. 1**.

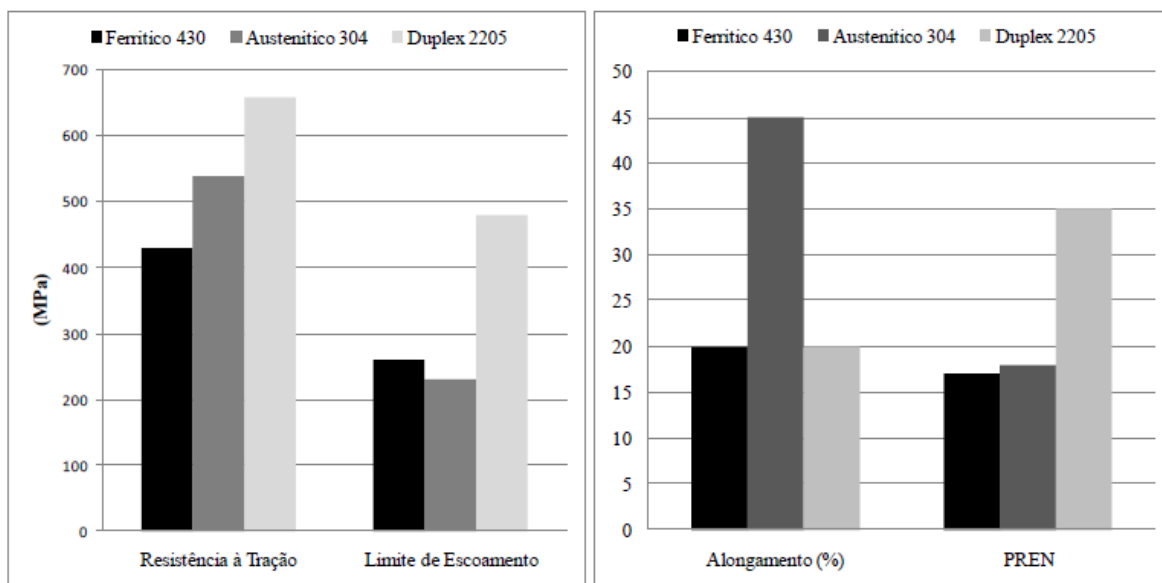
$$PRE = \%Cr + [(3,3) \times (\%Mo)] + [(16) \times (\%N)] \quad (1)$$

Dessa maneira, aços inoxidáveis bifásicos (ferrítico e austenítico), cujos valores do PRE forem da ordem de 35 a 40, constituem a família dos aços inoxidáveis duplex e aqueles cujo PRE for superior a 40 constituem a família dos inoxidáveis superduplex (MARTINS, CASTELETTI, 2007).

Quanto às suas propriedades mecânicas, os AID possuem alta tenacidade e ductilidade se comparado com aços ferríticos e martensíticos. E também apresentam limite de escoamento duas vezes maior que o aço inoxidável austenítico. A **Tabela 1**, juntamente com **Figura 3**, mostra alguns valores referente as propriedades mecânicas entre diferentes classes de AI.

**Tabela 1:** Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, duplex e superduplex. Adaptado de Loureiro (2010). Na tabela abaixo, tem-se: Limite de escoamento, limite de resistência a tração e valores de dureza

AISI/UNS	Resistência ao escoamento (MPa)	Resistência a tração (Mpa)	Alongamento mínimo (%)	Dureza Vickers	Microestrutura
304L	210	515-680	45	155	Austenita
316L	220	515-690	40	160	Austenita
S32304	400	600-820	25	230	Duplex
S32205	450	680-880	25	260	Duplex
S32750	550	800-1000	25	290	Duplex



**Figura 3:** Comparação de propriedades mecânicas entre diferentes classes de AI (MEINDHART, 2013)

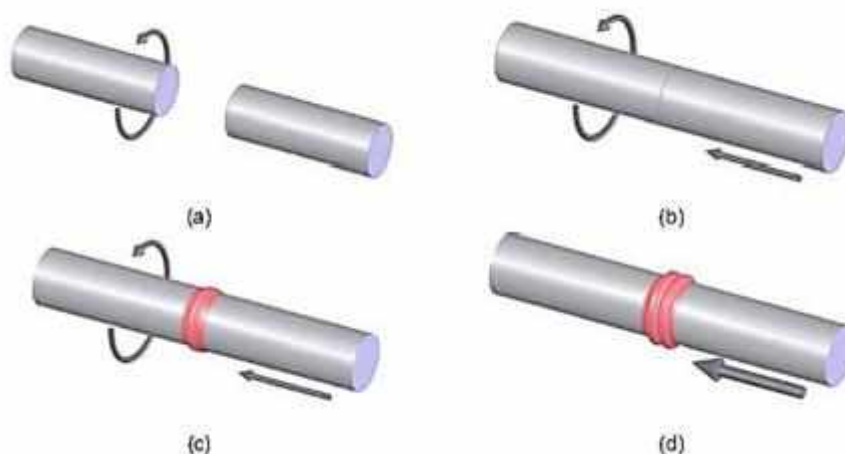
O aço inoxidável UNS S32205, comumente conhecido como SAF 2205 (22,5 Cr-5,5 Ni) é um dos AID mais utilizados, considerado aço carro chefe (standard), responsável por mais de 80% do uso de duplex (ARTHUSO, 2013). Esta classe específica de AID possui as seguintes características: boa usinabilidade, elevada resistência à CST (corrosão sob tensão) em ambientes com cloretos e em ambiente contendo sulfeto de hidrogênio, alta resistência à corrosão em geral, por pite e corrosão por fresta, alta resistência mecânica, boa propriedade para trabalho a quente, alta resistência à corrosão por erosão e por fadiga, boa soldabilidade (MEINDHART, 2013).

Os aços inoxidáveis duplex não podem ser endurecidos por meio de tratamentos térmicos. Normalmente, estas ligas são utilizadas em faixas de temperaturas intermediárias, entre 60 a 300°C, nos quais a resistência a ácidos e soluções contendo cloreto são requeridas. Durante a fabricação dos aços inoxidáveis duplex são requeridos certos cuidados para se evitar a formação de fases secundárias indesejáveis e, além disso, manter iguais proporções entre fases ferrítica e austenítica.

Quanto às suas aplicações, os aços inoxidáveis duplex são amplamente utilizados em componentes que necessitam de elevada resistência à corrosão, como indústrias químicas, petroquímicas, plataformas offshore, e de dessalinização da água do mar. Na indústria de celulose e papel, digestores, tanques de armazenamento de celulose, tambores, equipamentos de alvejamento e máquinas de papel são fabricadas em aço inoxidável duplex. Há também aplicações do duplex em navios-tanque químicos e em transporte para maioria das substâncias químicas.

### 2.3. Processo de Soldagem por Atrito

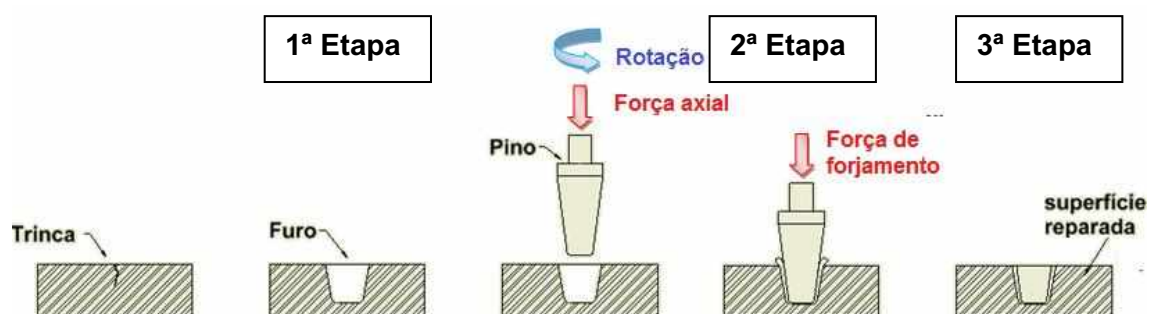
A técnica de soldagem por atrito é um processo de união no estado sólido, onde a junta soldada é obtida exatamente no local onde ocorre o movimento relativo entre as partes, submetendo as peças envolvidas, ou apenas uma delas, a elevadas cargas de compressão e de forjamento. Esta técnica consiste na transformação da energia mecânica fornecida a uma das peças em energia térmica, proveniente do calor gerado pelo atrito das superfícies em contato (AWS, 1991). A **Figura 4** apresenta o método de soldagem por atrito rotativo, onde uma das partes permanece fixa, enquanto a outra gira em torno do eixo de revolução (RODRIGUES, 2016).



**Figura 4:** Desenho esquemático do processo de soldagem por atrito convencional (RODRIGUES, 2016): a) Rotação de uma das peças; b) Aplicação da Força de Compressão; c) Início da soldagem; d) Fim da soldagem.

Dentre as várias soldagem (técnica de reparo) por atrito, o processo *Friction Tapered Plug Welding* (FTPW) é descrito com mais detalhes por ser a técnica correlacionada este trabalho. Tal processo é uma derivação do processo de soldagem por atrito apresentada por Andrews e Mitchel em 1990 e desenvolvida pelo TWI (The Welding Institute), com o objetivo de realizar reparos de estruturas offshore em condições subaquáticas (PIRES, 2007).

A técnica FTPW consiste em usar um furo cônico não passante em uma estrutura danificada (com presença de trincas) e realizar o preenchimento desta cavidade com um pino cônico consumível. A **Figura 5** ilustra as etapas do preenchimento FTPW.



**Figura 5:** Etapas do processo FTPW

A realização do processo FTPW é dividida em três etapas fundamentais (RODRIGUES, 2016):

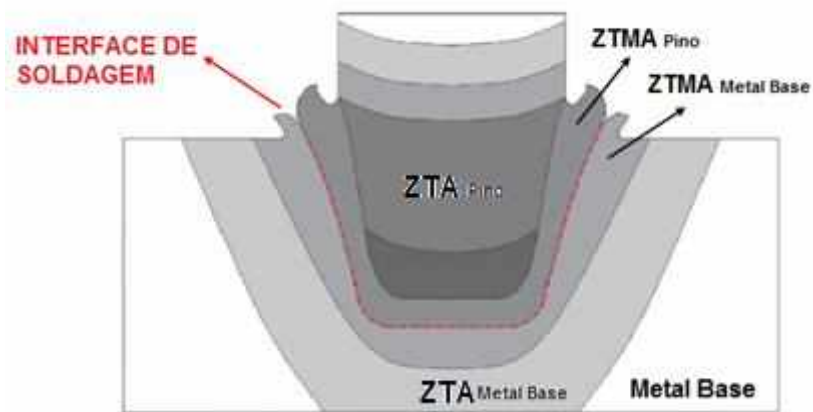
- Etapa de Furação: na qual é usinado um furo cego na estrutura na região a ser reparada, sendo a geometria do furo cônica;
- Etapa de Preenchimento: nesta ocorre a soldagem por atrito, onde um pino consumível de formato cônico é rotacionado e, simultaneamente, introduzido coaxialmente, com elevada força axial de compressão contra o fundo do furo pré-usinado na estrutura, a qual é mantida em um sistema de fixação rígido e estático. O contato estabelecido entre pino e a superfície do fundo da cavidade gera calor pela ação do atrito, resultando no aquecimento de ambas as superfícies. Este efeito térmico acarreta a formação de um fluxo viscoplástico em alta temperatura, que se propaga axialmente ao longo da seção do consumível (pino) ou pela interface pino-cavidade, promovendo assim o completo preenchimento do furo (PIRES, 2007);
- Etapa de acabamento ou fresamento: é realizada a usinagem do material do pino não processado e do material deformado plasticamente em forma de anel (flash), no intuito de obter a forma da superfície original.

As microestruturas das juntas soldadas FTPW podem ser divididas segundo (MEINHARDT, 2013) em zonas, conforme ilustrado na

**Figura 6:**

- Zona Termicamente Afetada (ZTA): região em que a microestrutura e as propriedades mecânicas sofrem a influência do calor gerado durante o processo de soldagem;
- Zona Termo Mecanicamente Afetada (ZTMA): onde a quantidade de calor é maior do que na ZTA, resultando em um aparecimento de grãos deformados.

Nesta região os grãos em formatos de ilhas no metal base são deformados no sentido de processamento.



**Figura 6:** Ilustração das zonas afetadas pelo processamento observadas em uma junta soldada. Adaptado de Meinhardt (2013)



## **CAPÍTULO III**

### **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Descrição do Equipamento de Soldagem por Atrito FTPW**

As juntas soldadas FTPW foram realizadas na Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X (UPPA X), desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS). O cilindro de reparo da UPPAX é compacto, com massa total de 17 kg, o que favorece aplicação em campo.

A UPPA X é acionada por meio de uma unidade hidráulica de potência, permitindo o deslocamento axial e o giro do eixo mecânico do equipamento. A UPPA X é apresentada na **Figura 7** e o cilindro de reparo é mostrado na **Figura 8**.



(a)



(b)

**Figura 7:** Unidade de Processamento Pinos por Atrito X (RODRIGUES, 2016)



**Figura 8:** Cilindro de reparo (RODRIGUES, 2016)

A **Tabela 2** resume a capacidade operacional do equipamento em termos de seus valores máximos.

**Tabela 2:** Capacidade máxima operacional da UPPA X (RODRIGUES, 2011)

<b>Força axial máxima (com rotação)</b>	40 kN
<b>Rotação Máxima</b>	5500 rpm
<b>Torque máximo</b>	88 N.m
<b>Capacidade de curso do cilindro</b>	45 mm

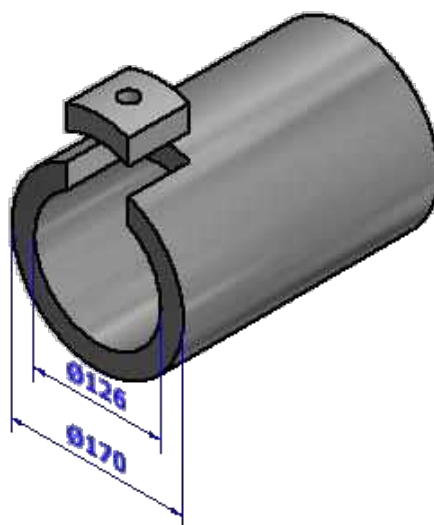
A parametrização e o monitoramento do processo de soldagem são realizados através de um software supervisor instalado em um computador industrial. O software foi implementado em linguagem LabVIEW, possui uma interface gráfica funcional e de fácil operação, viabilizando a rápida alimentação do programa com os dados de entrada necessários para a execução do processo de soldagem (rotação, força axial e comprimento de queima). O comprimento de queima é o deslocamento do pino a partir do contato da ponta do pino com o fundo da cavidade.

O programa disponibiliza em tempo real o comportamento da força axial, da rotação, do torque e do comprimento de queima, todos em função do tempo. O torque disponibilizado pelo cilindro de reparo é obtido através da diferença de pressão. As curvas são plotadas em janelas discretas na interface gráfica do software. Essas informações geradas são armazenadas e podem ser exportadas em arquivo tipo texto para análises futuras.

O sistema conta ainda com uma opção de segurança que interrompe o processo, caso o valor de alguma variável desvie repentinamente do seu valor de referência. O programa permite também que o próprio operador possa encerrar o processo a qualquer momento, caso esse verifique algum problema ou falha do sistema.

### 3.2. Materiais Empregados nas Juntas Soldadas

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável duplex UNS S32205, tanto do metal base quanto do pino. O metal base de todas as amostras foi obtido a partir de um tubo de 170 mm diâmetro externo e 126 mm de diâmetro interno. Na **Figura 9** é ilustrada a remoção de uma amostra de metal base do tubo. Os pinos de preenchimento em AID foram confeccionados a partir de barras cilíndricas com diâmetro de 20 mm.



**Figura 9:** Ilustração da remoção de amostra (metal base) a partir de um tubo

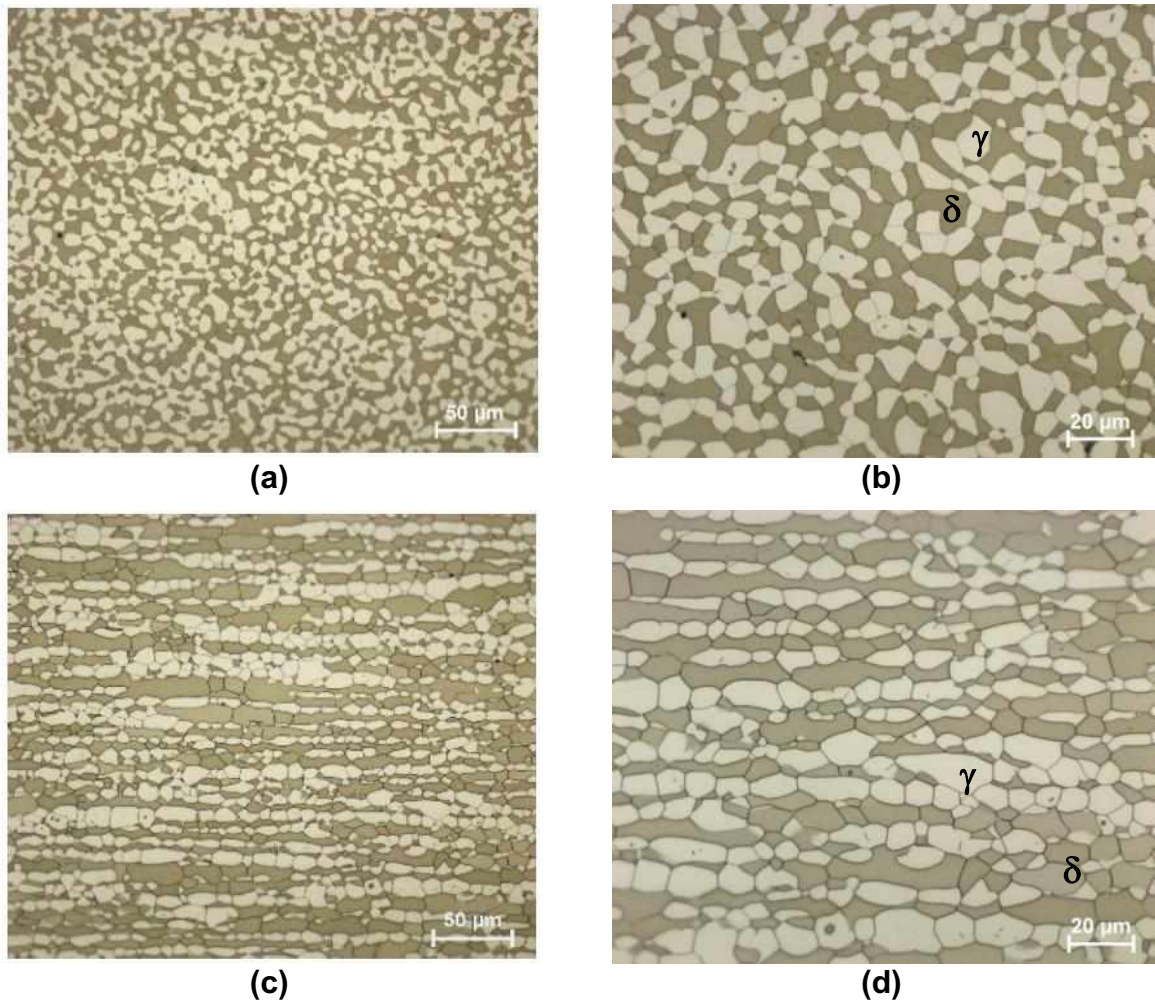
As composições químicas dos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova são apresentadas na **Tabela 3**. A análise química foi realizada através de espectroscopia de emissão ótica com plasma induzido, em equipamento da marca LECO, modelo GDS 500A. Nota-se, nesta tabela, com exceção do teor de elemento molibdênio da barra, que os resultados obtidos da análise de composição química estão dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM A276/276M (2016) para o aço inoxidável duplex UNS S32205.

**Tabela 3:** Composição química dos materiais utilizados para fabricação do metal base e do pino (% em peso).

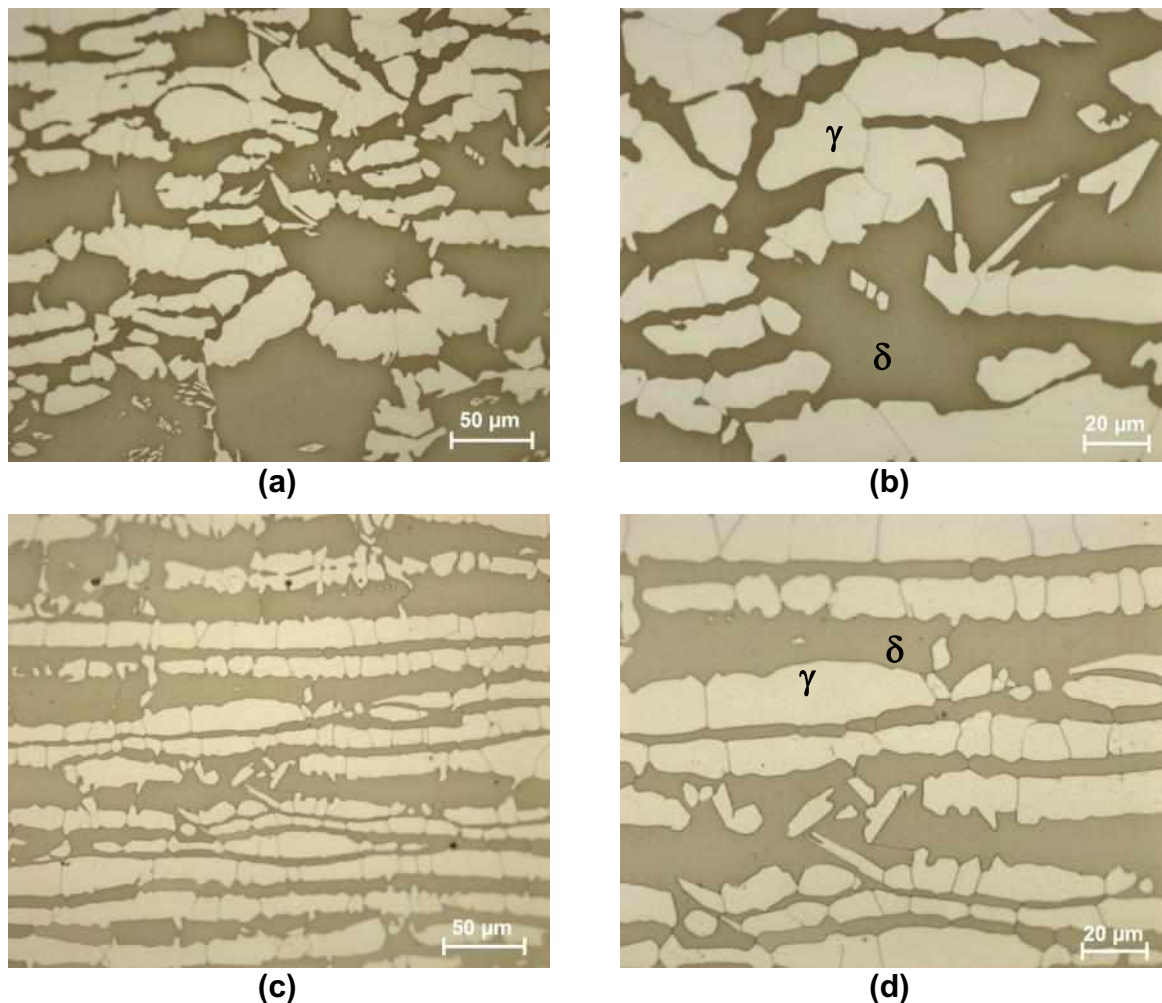
Amostra	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P	Cu
Tubo	0,02	1,69	22,18	5,68	3,06	0,54	0,00	0,02	0,3
Barras	0,02	1,56	22,20	5,13	2,59	0,53	0,00	0,02	0,1
*UNS S32205	0,03 máx.	2,00 máx.	22,0 à 23,0	4,50 à 6,50	3,0 à 3,5	1,00 máx.	0,02 máx.	0,03 máx.	-

(\*) especificações da norma ASTM A276/A276M para o aço UNS S32205

As ligas de AID no estado como fornecido foram caracterizadas a nível de microestrutura. As análises microestruturais foram realizadas nas seções transversais e longitudinais dos materiais. A **Figura 10** mostra as microestruturas das barras utilizadas para a fabricação dos pinos de preenchimento e a **Figura 11** mostra as microestruturas dos tubos utilizados para a fabricação do metal base. Nestas imagens, o ataque químico revelou a fase ferrita ( $\delta$ ) de cor marrom escuro e a fase austenita ( $\gamma$ ) de cor marrom claro.



**Figura 10:** (a) e (b) Microestrutura da seção transversal da **barra** para fabricação dos pinos em AID, imagens com aumentos diferentes; (c) e (d) microestrutura da seção longitudinal da barra para fabricação dos pinos em AID, imagens com aumentos diferentes (HNO<sub>3</sub> eletrolítico)



**Figura 11:** (a) e (b) Microestrutura da seção transversal do **tubo** para fabricação do metal base em AID, imagens com aumentos diferentes; (c) e (d) microestrutura da seção longitudinal da tubo para fabricação do metal base em AID, imagens com aumentos diferentes (HNO<sub>3</sub> eletrolítico)

Nas microestruturas da seção longitudinal das barras (**Figura 10 c e d**) e dos tubos (**Figura 11 c e d**) é evidenciada a orientação microestrutural (bandeamento) decorrente do processo de conformação mecânica do tubo e da barra. Quando comparadas as microestruturas da barra e do tubo, nota-se um tamanho de grão maior nos microconstituintes do tubo. Esta diferença no tamanho de grão se deve às diferentes condições no processo termomecânico de fabricação destes materiais, bem como do tratamento térmico de homogeneização.

As frações volumétricas das fases nos materiais no estado como fornecido também foram verificadas ao longo da espessura nas seções transversais e longitudinais. Os resultados são mostrados na **Tabela 4**. Observa-se que as frações volumétricas das fases ferrítica e austenítica estão em equilíbrio. Estes resultados estão condizentes com o esperado para as ligas de AID, estas devem apresentar proporções aproximadamente iguais



entre ferrita e austenita (ASTM A995/995M, 2016). O equilíbrio entre fases nos AID proporciona a combinação da elevada resistência mecânica e resistência à corrosão destes materiais.

**Tabela 4:** Frações volumétricas da fase ferrita medidas nas seções transversais e longitudinais da barra e do tubo em AID no estado como fornecido

MATERIAIS	Barra AID como fornecida		Tubo AID como fornecido	
	Seção Transversal	Seção Longitudinal	Seção Transversal	Seção Longitudinal
Fração Volumétrica (%)	48,78	50,59	60,97	60,90
Desvio Padrão (%)	2,07	2,51	4,06	9,53

### 3.3. Parâmetros do Processo de Soldagem

Os ensaios executados neste trabalho foram previamente organizados conforme mostra a **Tabela 5**, totalizando seis juntas soldadas. Os parâmetros utilizados para a realização destas juntas foram baseados na literatura, sobretudo no trabalho de Pires (2007). Os parâmetros de soldagem foram mantidos constantes para todos os ensaios realizados e são mostrados na **Tabela 6**.

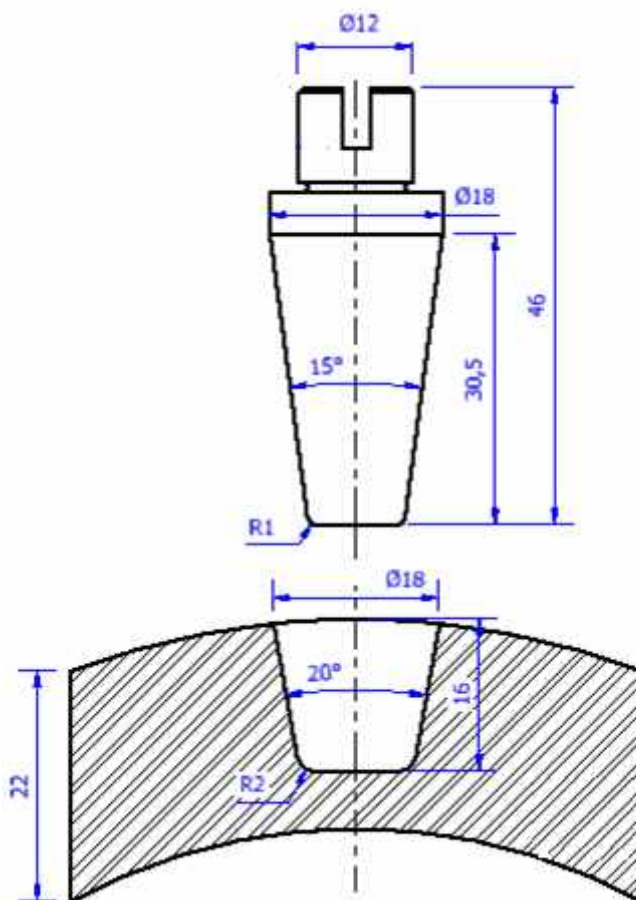
**Tabela 5:** Matriz de ensaio

Atividade	Método/ Ensaio	Nº de amostras soldadas
Avaliação microestrutural	Microscopia óptica	1
Avaliação de propriedades mecânicas	Dureza	1
	Microdureza	
	Tração	1
	Dobramento	3

**Tabela 6:** Parâmetros de ensaio para soldagem FTPW

Força axial [kN]	30
Comprimento de queima [mm]	8
Força de forjamento [kN]	30
Rotação [rpm]	5500
Tempo de forjamento [s]	10

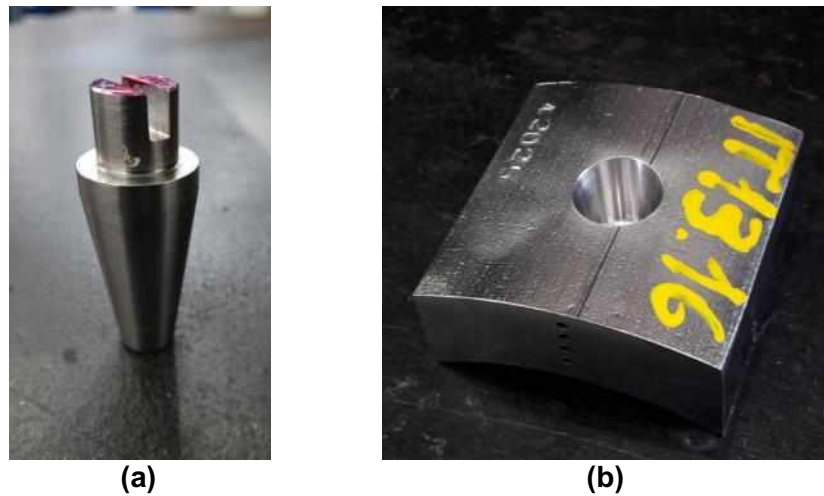
As geometrias do pino e do metal base foram escolhidas com base em estudos já realizados por Pires (2007), e estas são apresentadas na **Figura 12**. Para todos os ensaios, os parâmetros geométricos foram mantidos constantes.



**Figura 12:** Geometrias dos materiais confeccionados para os ensaios

Após fabricação (**Figura 13**), as tolerâncias dimensionais dos pinos foram verificadas segundo as condições de projeto. Para medir os diâmetros e comprimentos foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo, com resolução 0,01 mm, enquanto o raio de concordância foi verificado com auxílio de calibre de raio Mitutoyo N°186-105. O ângulo do cone foi medido com auxílio de uma Máquina de Medir por Coordenadas (Mitutoyo BR 433) do Laboratório de Metrologia Dimensional da Universidade Federal de Uberlândia. Como resultado, os valores das medições se encontraram dentro das tolerâncias exigidas. Quanto a execução das furações nos metais base, esta foi realizada na oficina do LTAD, com auxílio de ferramentas de usinagem específicas. Estas ferramentas foram desenvolvidas e verificadas dimensionalmente por Rodrigues (2016).

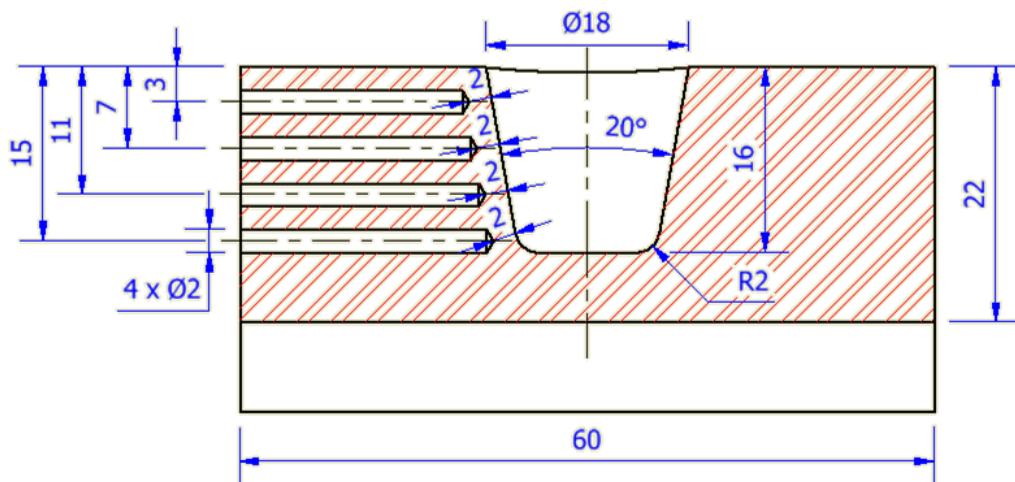




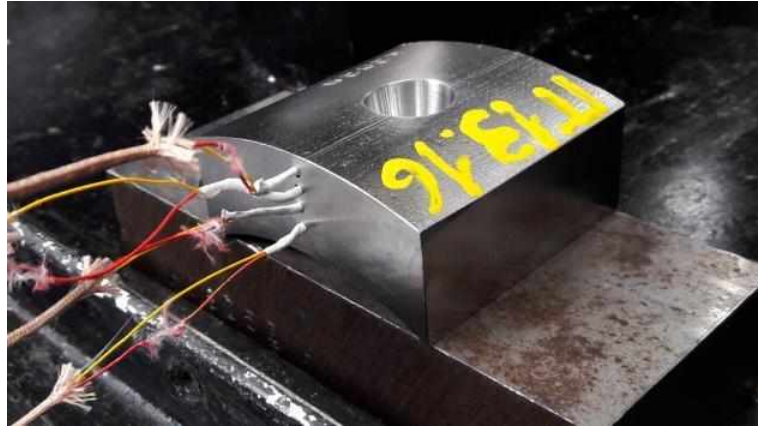
**Figura 13: (a) pino (b) metal base**

### 3.4. Medição do Ciclo Térmico de Soldagem

A medição do ciclo térmico de soldagem foi executada por meio de termopares inseridos no metal base. Neste procedimento foram utilizados quatro termopares tipo K (Cromel/Alumel), com diâmetro de cada fio de 0,255 mm (30 AWG) e faixa de medição estabelecida entre -200 a 1200 °C. A geometria do metal base utilizada nesta etapa é mostrada na **Figura 14**. Nesta imagem observa-se a presença de quatro furos laterais com 2 mm de diâmetro, cujos fundos distam 2 mm da interface da junta soldada. No interior dos furos, os termopares foram alojados (soldados por meio de solda capacitiva), conforme mostrado na **Figura 15**.

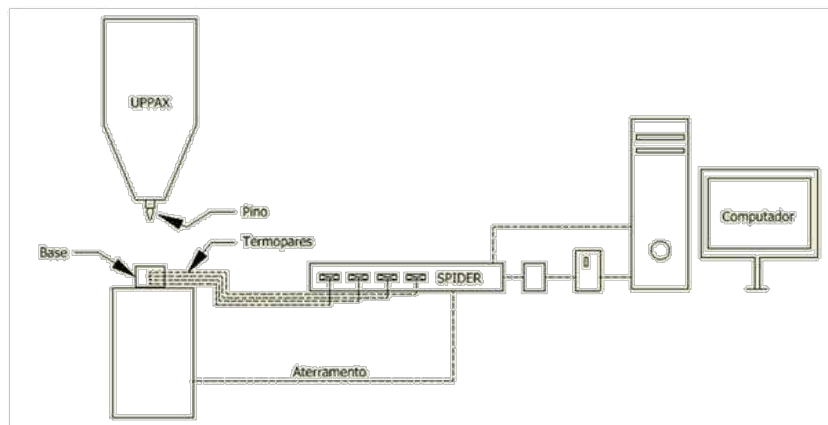


**Figura 14: Geometria do metal base, com cavidades para inserção dos termopares**  
Dimensões em milímetros



**Figura 15:** Posicionamento dos termopares no metal de base

O monitoramento das temperaturas em tempo real foi realizado por um programa computacional desenvolvido em LabVIEW®. A aquisição de sinais dos quatro termopares ocorreu por meio de um condicionador de sinais, da marca HBM, modelo Spider8, a uma taxa de 50 Hz. O condicionador de sinais é responsável pela aquisição, amplificação, filtragem e conversão analógico-digital dos sinais obtidos dos termopares. A **Figura 16** ilustra o sistema de aquisição e monitoramento das temperaturas.



(a)



(b)

**Figura 16:** (a) Representação esquemática de medição do ciclo térmico e (b) sistema real

### 3.5. Análise da Macroestrutura e Microestrutura

#### 3.5.1. Macrografia

Para a análise da macrografia a junta soldada foi, inicialmente, submetida a um processo de corte para remoção da porção superior do pino. Logo após, a junta soldada foi seccionada longitudinalmente em relação ao pino, ao longo de um plano paralelo ao centro do furo, visando, deste modo, preservar a seção central para realização de estudos de qualificação do reparo. Todos os cortes aqui realizados foram executados mediante o uso de disco abrasivo refrigerados com fluxo de fluido refrigerante, buscando-se, assim, minimizar o efeito térmico do corte na macroestrutura. E, por fim, as superfícies foram fresadas e retificadas visando garantir paralelismo entre a superfície de análise e a face oposta.

A seção a ser analisada foi lixada, seguindo técnicas metalográficas convencionais, utilizando sequencialmente lixas d'água seguindo as granulometrias 200, 320, 400, 600 *mesh*, lavada com água corrente, limpa em banho ultrassônico com álcool, secada e atacada com solução aquosa de ácido nítrico (40%). Este ataque no entanto não revelou a macroestrutura.

Novo procedimento foi adotado partindo da remoção do ataque anterior e seguindo a preparação metalográfica para análise microestrutural ou seja lixamento com lixas abrasivas de 200, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Posteriormente, a amostra foi limpa com álcool em banho ultrassônico e polida com pasta de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Após o polimento, a microestrutura foi revelada mediante ataque químico eletrolítico em solução de 40 % do volume de ácido nítrico em água destilada com aplicação de tensão entre 1,2 - 1,3 V. O tempo de duração do ataque variou entre 4 e 8 minutos. Em seguida, a imagem da macroestrutura da amostra foi digitalizada a por meio de um scanner (Hewlett Packard ScanJet 4C).

#### 3.5.2. Micrografia

Para a realização das imagens de micrografia, inicialmente removeu-se o ataque químico realizado para a macrografia da junta soldada. Logo após, a amostra foi polida com pasta de diamante (6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ ) e sílica coloidal (0,4  $\mu\text{m}$ ). E, por fim, foi atacada mediante ataque químico eletrolítico com solução de 40 % do volume de ácido nítrico em água destilada, com tempo de imersão variando entre 2 e 3 minutos e aplicada tensão 1,3 V.

Para a aquisição e tratamento de imagens foi utilizado o microscópio ótico Olympus

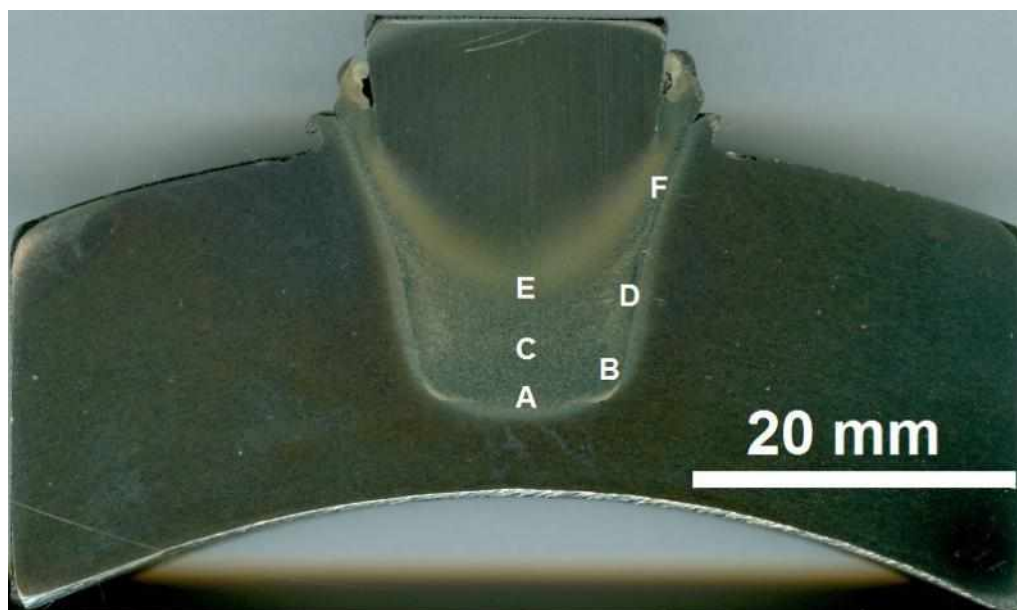
BX51M, equipado com câmera Carl Zeiss AxioCam ICc5 e software Carl Zeiss Axio Vs40 8.2.0 (**Figura 17**). As imagens foram adquiridas com objetivas 20x, 50x e 100x de aumento.



**Figura 17:** Microscópio óptico utilizado para aquisição de imagens nas etapas de micrografia e metalografia quantitativa

Visando sistematizar o procedimento de análise da microestrutura, as fotomicrografias foram realizadas conforme as posições indicadas na **Figura 18**. Nesta figura, seis posições foram estabelecidas e foram determinadas da seguinte maneira:

- Posição A:** centro da junta soldada na interface pino/metal base na raiz da solda;
- Posição B:** interface pino/metal base no raio de concordância da raiz da solda;
- Posição C:** posição central na metade da altura da zona processada do pino;
- Posição D:** interface pino/metal base na metade da profundidade da junta soldada;
- Posição E:** região central da junta soldada no final da ZTMA do pino;
- Posição F:** interface pino/metal base a 2 mm do topo da junta soldada.

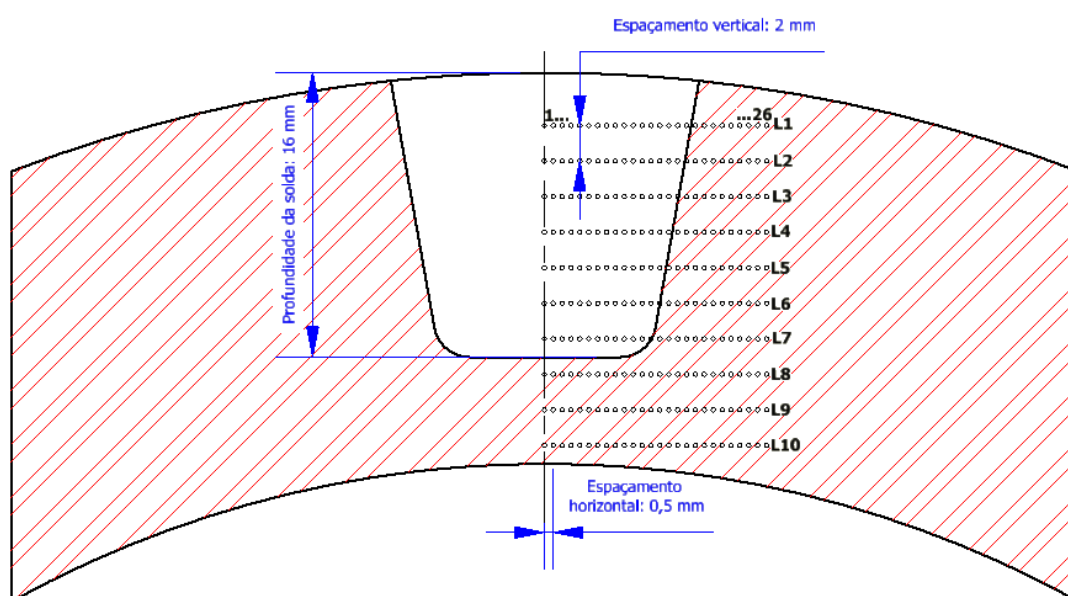


**Figura 18:** Mapa de identificação das posições de investigação da microestrutura

### 3.5.3. Quantificação Volumétrica das Fases Ferrítica e Austenítica

Para obter as frações volumétricas da austenita ( $\gamma$ ) e ferrita ( $\delta$ ) na junta soldada, foi utilizada a técnica de metalografia quantitativa, mediante análise digital de imagens conforme a norma ASTM E1245 (2009). Para a aquisição e tratamento de imagens foi utilizado o microscópio ótico Olympus BX51M, câmera Carl Zeiss AxioCam ICc5 e software Carl Zeiss Axio Vs40 8.2.0.

As imagens para quantificação das fases foram realizadas na seção longitudinal das amostras preparadas metalograficamente. A **Figura 19** ilustra o mapeamento adotado para aquisição das imagens. Os espaçamentos verticais e horizontais entre as imagens foram mantidos constantes e iguais a 2 mm e 0,5 mm, respectivamente. Neste mapeamento, as frações volumétricas foram obtidas na metade da seção da junta soldada, delimitadas verticalmente entre o centro da amostra e o final da ZTMA no metal base e, horizontalmente, entre as posições 3 mm abaixo do topo da amostra e a 1 mm acima da parte inferior do metal base. Devido à variação dimensional dos microconstituintes observados, a aquisição das imagens foi obtida com objetivas de 50x e 100x.



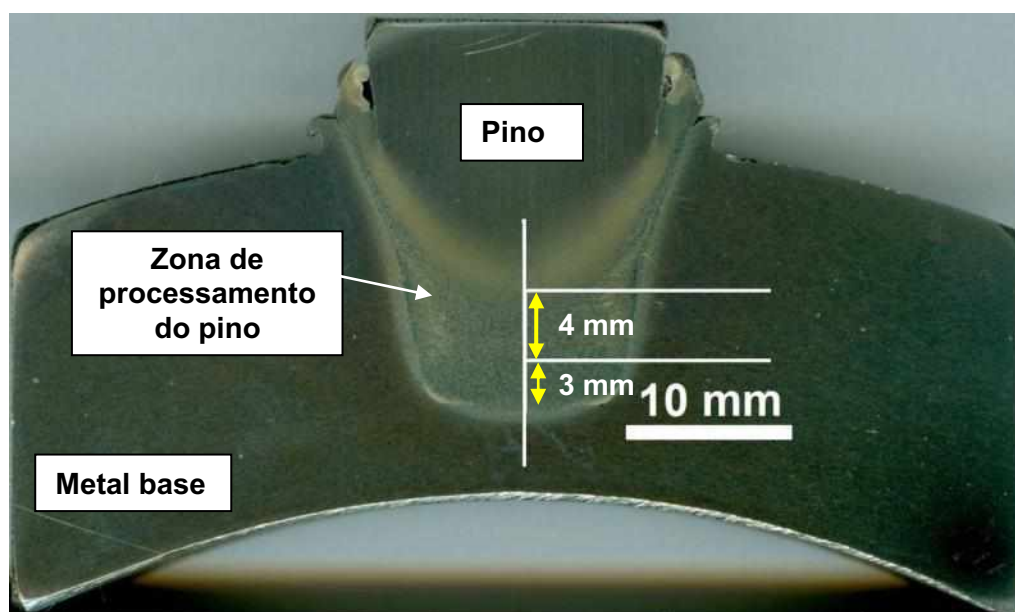
**Figura 19:** Ilustração do procedimento de aquisição de imagens para quantificação volumétrica de fases

### 3.6. Ensaio de Dureza Vickers

#### 3.6.1. Macro dureza

Para realização dos perfis de dureza Vickers, foi utilizada a mesma superfície preparada para as observações microestruturais.

Neste trabalho foram executados três perfis de dureza, sendo um vertical e dois horizontais. O perfil vertical teve início a 3,6 mm abaixo da interface inferior (raiz da solda), finalizando na microestrutura original do pino. O primeiro perfil horizontal foi realizado a 3 mm acima da interface inferior, e o segundo a 7 mm acima desta. Ambos tiveram início no centro da amostra e estenderam-se em direção as interfaces laterais, sendo finalizados no metal base, região que não ocorreu influência do processo de soldagem. A **Figura 20** mostra o posicionamento dos perfis.



**Figura 20:** Posicionamento dos perfis de dureza (macro)

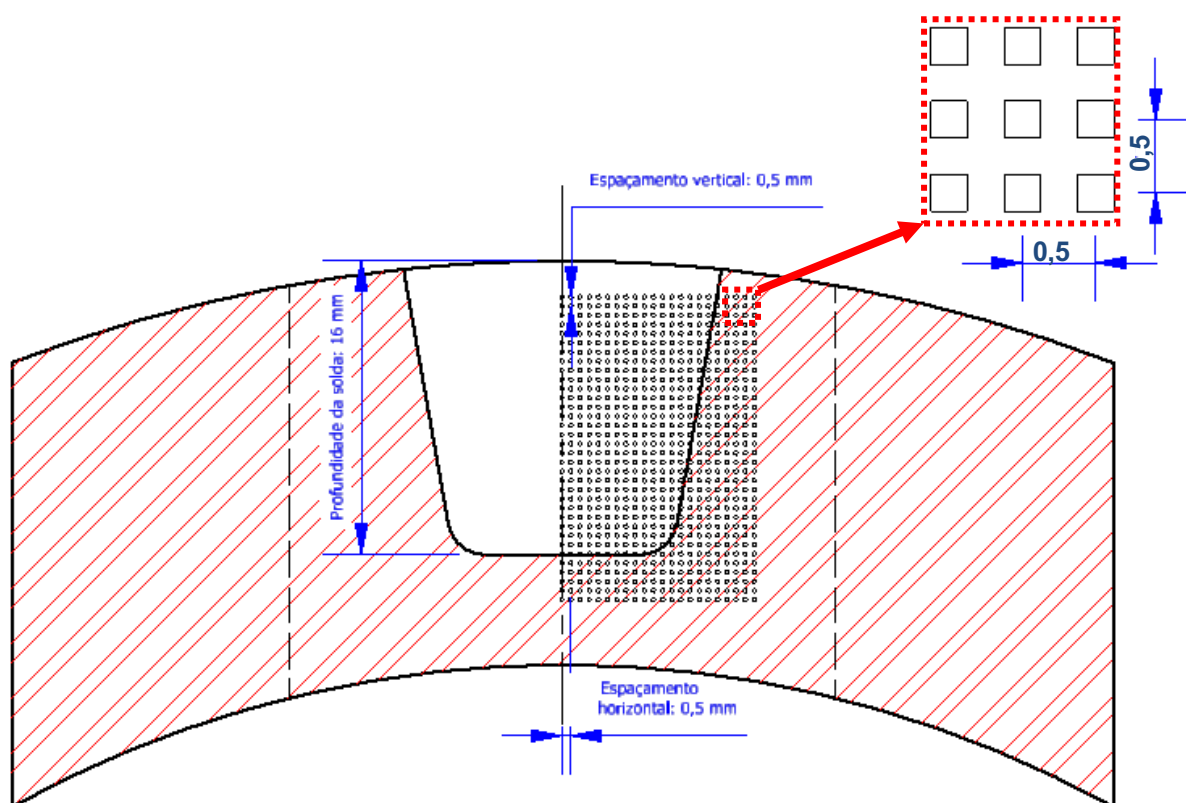
Para este ensaio foi utilizado o microdurômetro da marca Stiefelmayer modelo KL4. O espaçamento utilizado entre as indentações foi de 0,6 mm, a carga aplicada foi de 5,0 kgf e o tempo de carregamento foi de 30 segundos.

#### 3.6.2. Microdureza

Com a finalidade de obter as durezas entre cada zona da junta soldada, foi elaborado um mapa de microdureza (**Figura 21**). As indentações foram realizadas na seção



longitudinal da amostra preparada metalograficamente, similar à etapa de preparação para micrografia, variando apenas a tensão e tempo do ataque químico eletrolítico para 1,2 V e 1 minuto, respectivamente.

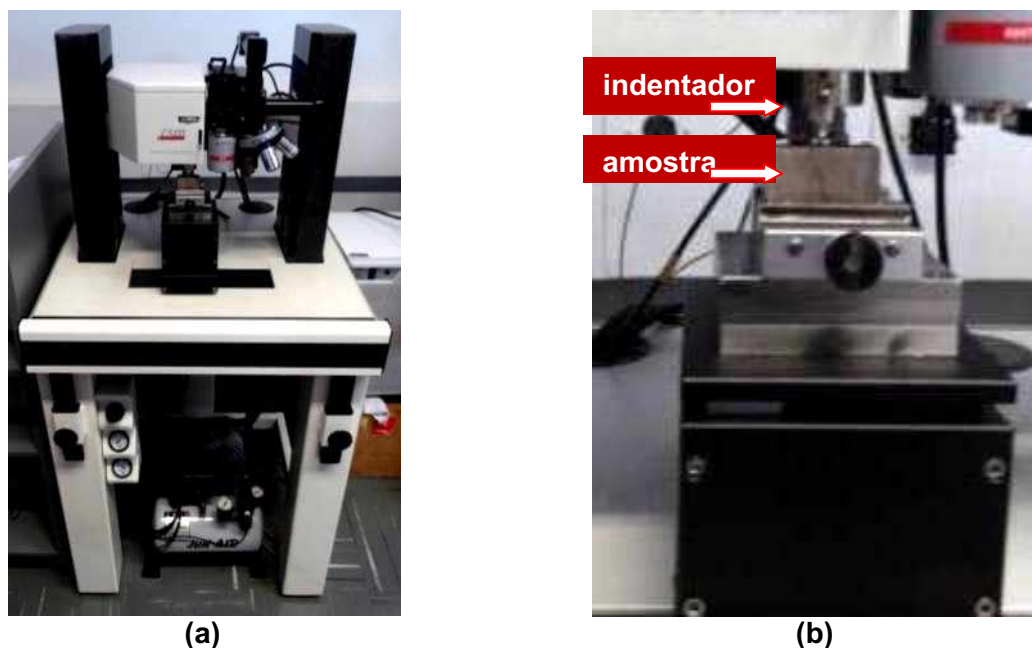


**Figura 21:** Mapa de microdureza

A **Figura 21** mostra o mapeamento adotado para a realização das microindentações obtidas na metade da seção da junta soldada, devido à simetria da mesma. Em consequência da geometria curva da amostra, as indentações foram iniciadas aproximadamente a 2 mm abaixo do topo da amostra estendendo-se verticalmente até a região do metal base. Enquanto horizontalmente, as indentações foram iniciadas no centro da amostra estendendo-se até a região do metal base sem efeito térmico. Os espaçamentos verticais e horizontais entre cada indentação foram ambos de 0,5 mm.

Nesta etapa foi utilizado o microdurômetro instrumentado da marca CSM Instruments, modelo Micro-Combi Tester (**Figura 22**). O ensaio foi executado com carga crescente aplicada até o máximo de 0,3 kgf (HV 0,3), conforme norma ASTM E92 (2017), pausa de 15 segundos após atingida esta força, com taxa de carregamento e de descarregamento de 0,6 kgf/min.

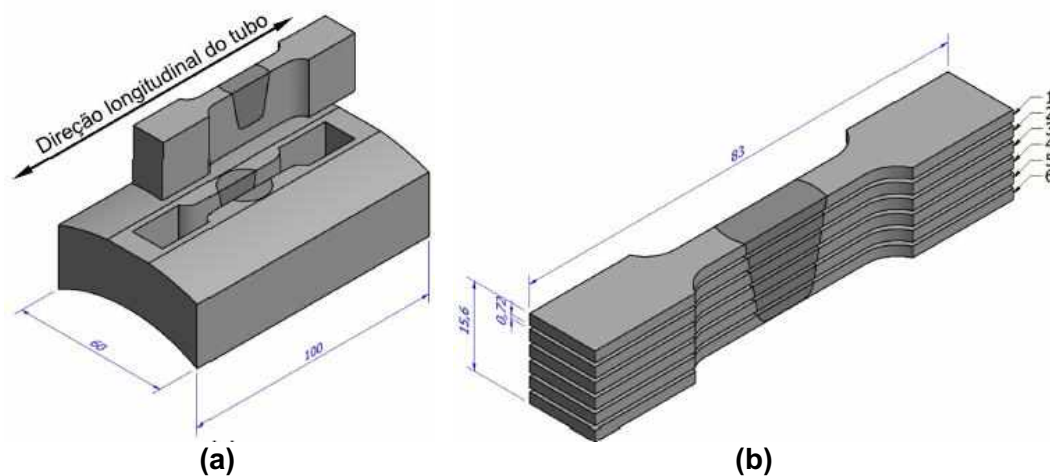




**Figura 22: (a) Microdurômetro (b) Amostra posicionada sobre a mesa**

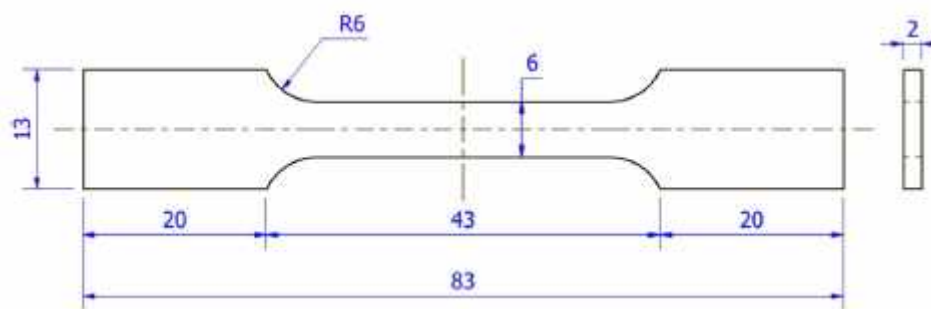
### 3.7. Ensaio de Tração

Os corpos de prova de tração foram usinados ao longo da direção longitudinal do tubo, em uma junta com dimensões 60 x 100 mm<sup>2</sup>, conforme indicado na **Figura 23 a**. Depois de efetuada a solda FTPW, o material excedente do pino foi removido por fresamento e um rebaixo de 0,4 mm na superfície da solda foi usinado para remoção do raio de curvatura sobre a superfície soldada. Em seguida, foram usinados seis corpos de prova, por meio de eletroerosão a fio, removidos ao longo da profundidade da junta soldada (**Figura 23 b**). Na eletroerosão a fio foi utilizado um fio de 0,12 mm de diâmetro, fluido dielétrico na concentração DIC-206, Brix entre 11 % e 12,5 % e tecnologia de corte C821 (desbaste), o equipamento utilizado foi uma máquina de eletroerosão da marca Agie Charmilles modelo FW2U.

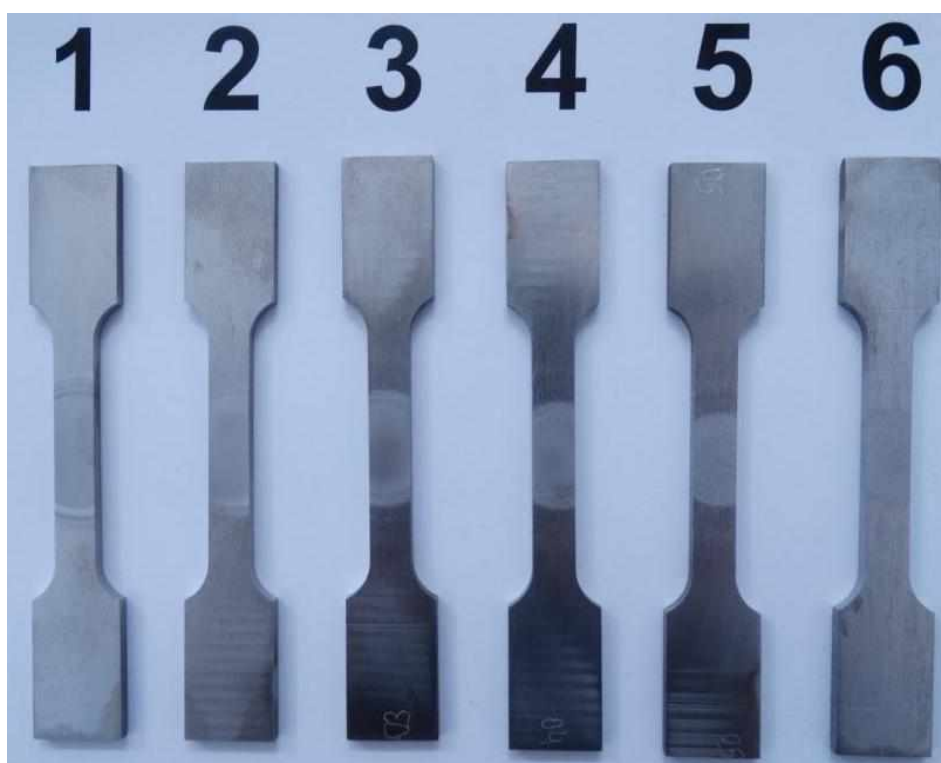


**Figura 23:** Ilustração da obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração (FRANCO, 2017)

Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova padronizados segundo a norma ASTM E8/E8M-15a (2016), com dimensões mostradas na **Figura 24**. Depois de usinados, os corpos de prova foram preparados metalograficamente, e levemente atacados apenas com a finalidade de identificar a região central da solda, como pode ser visto na **Figura 25**.



**Figura 24:** Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, segundo norma ASTM E8/E8M-15a (2016)

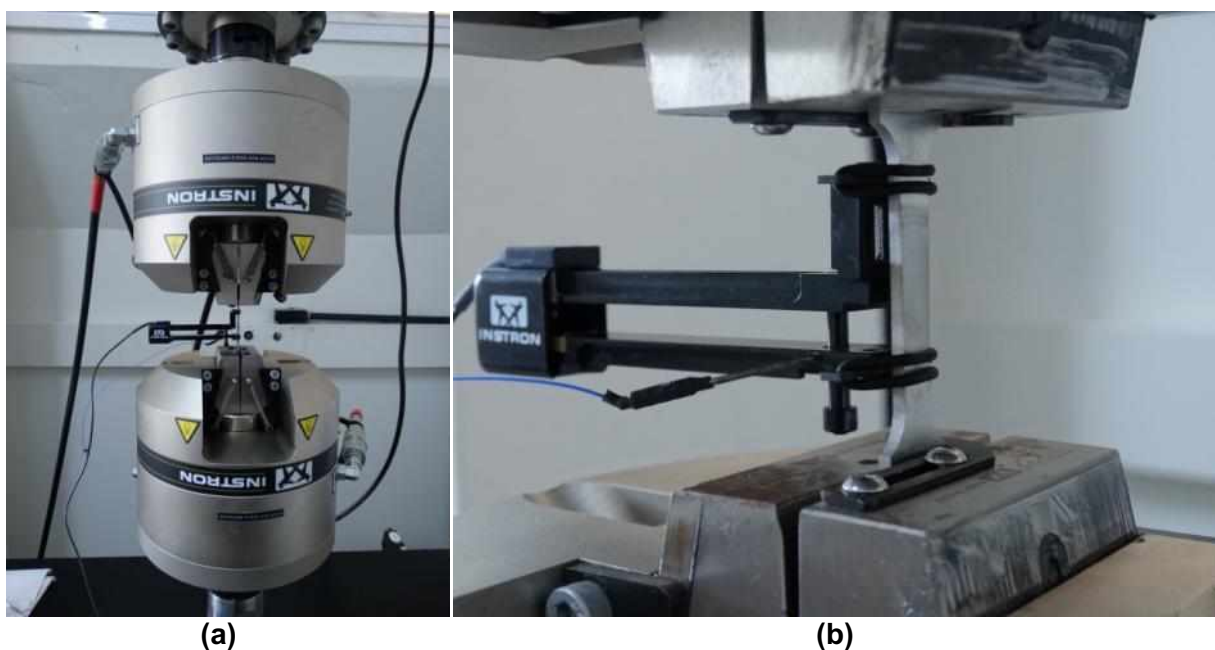


**Figura 25:** Corpos de prova para ensaio de tração

Os ensaios de tração foram executados seguindo norma ASTM E8/E8M-15a (2016), sendo utilizada uma taxa de deslocamento 1 mm/min. Para a realização dos ensaios foi utilizado uma máquina de ensaio servo hidráulica da fabricante INSTRON, modelo 8801, com capacidade de carga de 100 kN (**Figura 26**). Inicialmente, as amostras foram posicionadas entre as garras do equipamento, em seguida foi instalado o extensômetro (com curso de  $\pm 5$  mm e comprimento de medição de 25 mm) conforme mostra a **Figura 27**. O extensômetro foi posicionado sobre a amostra com a finalidade de medir a deformação do material com maior exatidão.



**Figura 26:** Máquina utilizada para realizar ensaio de tração

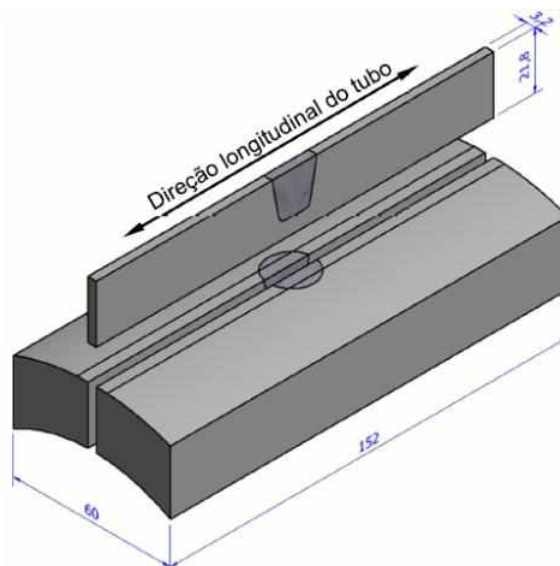


**Figura 27:** (a) posicionamento da amostra entre as garras e (b) acoplamento do extensômetro no corpo de prova

### 3.8. Ensaio de Dobramento

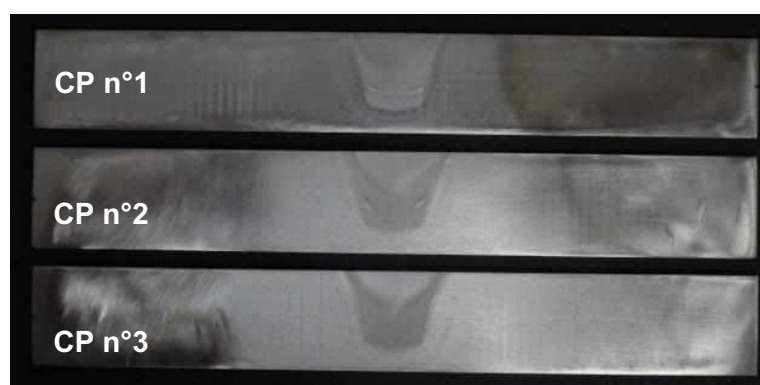
A ductilidade da junta soldada foi avaliada por meio de ensaio de dobramento lateral conforme previsto na norma ASTM E190-14 (2016). O metal base utilizado para executar a junta soldada possui comprimento de 152 mm e largura de 60 mm. Desta junta foi retirado o corpo de prova para o ensaio de dobramento com comprimento também de 152 mm, largura

de 21,8 mm e espessura de 3,2 mm. A **Figura 28** ilustra a posição do corpo de prova em relação a junta soldada.



**Figura 28:** Ilustração da obtenção do corpo de prova para ensaio de dobramento em uma junta soldada (FRANCO, 2017)

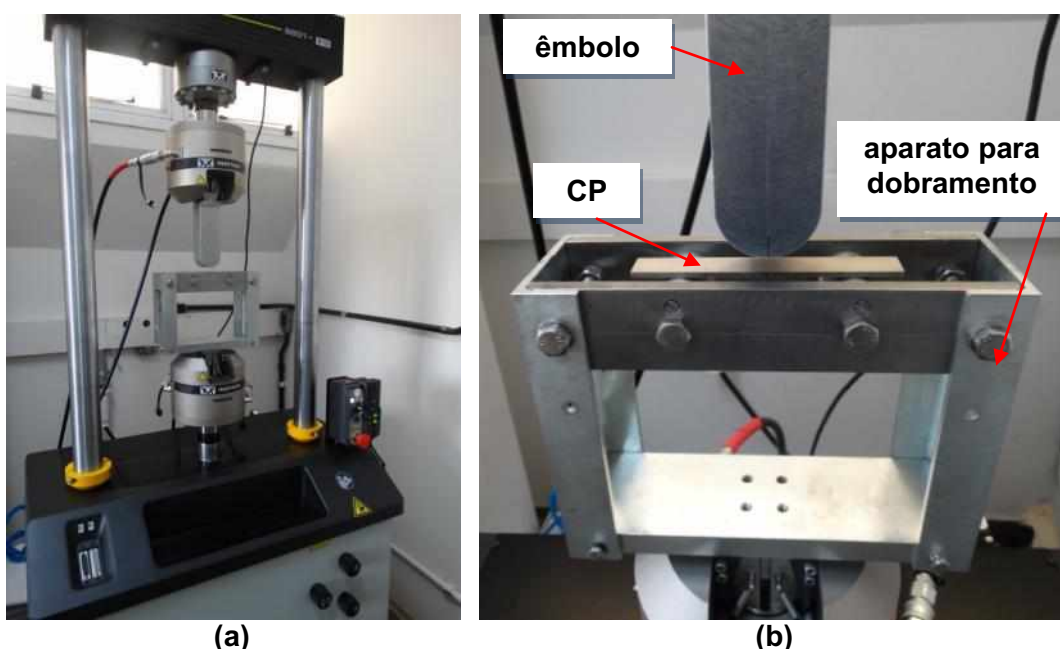
Nesta etapa foram usinados três corpos de prova (CP's) a partir de três juntas soldadas distintas, por meio de eletroerosão a fio. Em seguida, os corpos de prova foram lixados, seguindo técnicas metalográficas convencionais, utilizando sequencialmente lixas d'água seguindo as granulometrias 320, 400, 600, 1200 *mesh* e, posteriormente, polidos com pasta de diamante (9  $\mu$ m). Na sequência, a região da solda foi revelada mediante ataque químico eletrolítico em solução de 40 % de ácido nítrico em água destilada e aplicada tensão entre 1,5 V - 2,0 V. O tempo de duração do ataque variou entre 6 e 7 minutos (**Figura 29**).



**Figura 29:** Corpos de prova antes do ensaio de dobramento

Para a realização dos ensaios de dobramento foi utilizado um dispositivo/aparato

acoplado à máquina de ensaio servo hidráulica da fabricante INSTRON modelo 8801 (**Figura 30 a**). Tal aparato foi projetado conforme as normas ASTM E190-14 (2016) e AWSB4.0-98 (1998). Este dispositivo permite que a seção central da amostra seja impelida por um êmbolo, fazendo com que as extremidades sejam forçadas a encostarem sobre dois roletes, e assim a amostra é flexionada em torno de sua seção central (região da solda). Inicialmente, os corpos de prova foram posicionados sobre os roletes (**Figura 30 b**). Então foi executada a aproximação do êmbolo com a finalidade de realizar o dobramento do corpo de prova. O ensaio foi realizado com taxa de deslocamento de 1 mm/s. Segundo a norma AWSB4.0-98 (1998), o tempo de duração do ensaio deve ser superior a 15 segundos e inferior a 2 minutos.



**Figura 30:** (a) Máquina utilizada para execução do ensaio de dobramento, (b) corpo de prova posicionado sobre os roletes

Na Eq. 2 tem-se o grau de deformação ou alongamento percentual na superfície externa da amostra ( $e$ ). Esta equação depende da espessura da amostra ( $T$ ) e do raio de curvatura na superfície interna ou raio do êmbolo ( $A$ ), cujos valores são 3,2 mm e 27 mm, respectivamente. A deformação percentual máxima conseguida no teste é de 5,6 %, alcançado na superfície mais externa tracionada.

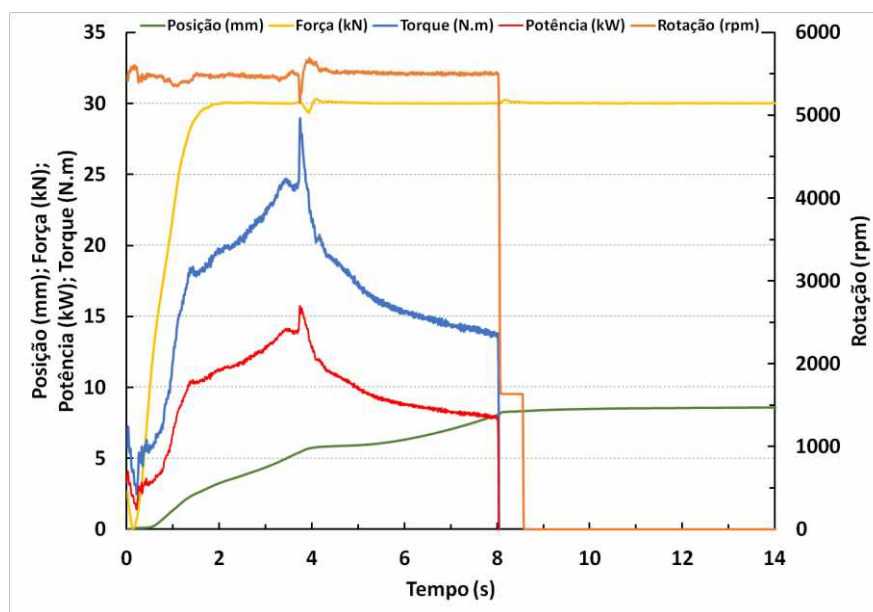
$$e = \frac{T * 100}{2A + T} \quad (2)$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1. Análise de Sinais do Processo de Soldagem FTPW

Nesta etapa construiu-se o gráfico a partir das aquisições dos sinais de comprimento de queima, força axial, torque, potência e rotação, todos em função do tempo. A **Figura 31** mostra o gráfico com os parâmetros do processo de soldagem da junta soldada.



**Figura 31:** Parâmetros do processo de soldagem da junta soldada

Neste gráfico observa-se que a soldagem foi executada dentro dos parâmetros de ensaio estabelecidos, com valores de rotação em torno de 5500 rpm e força normal constante ao longo do processo em 30 kN. No instante de 3,7 segundos, observam-se leves picos no torque (27 N.m) e na potência (16 kW), assim como pequenas quedas na força e rotação, justificados pelo cisalhamento a quente do pino durante o processo.

O processo de soldagem ocorreu em aproximadamente 8,0 segundos, e neste intervalo de tempo foi calculada a energia de soldagem segundo a **Eq.3**. Para este ensaio obteve-se energia de soldagem de 77,5 kJ.

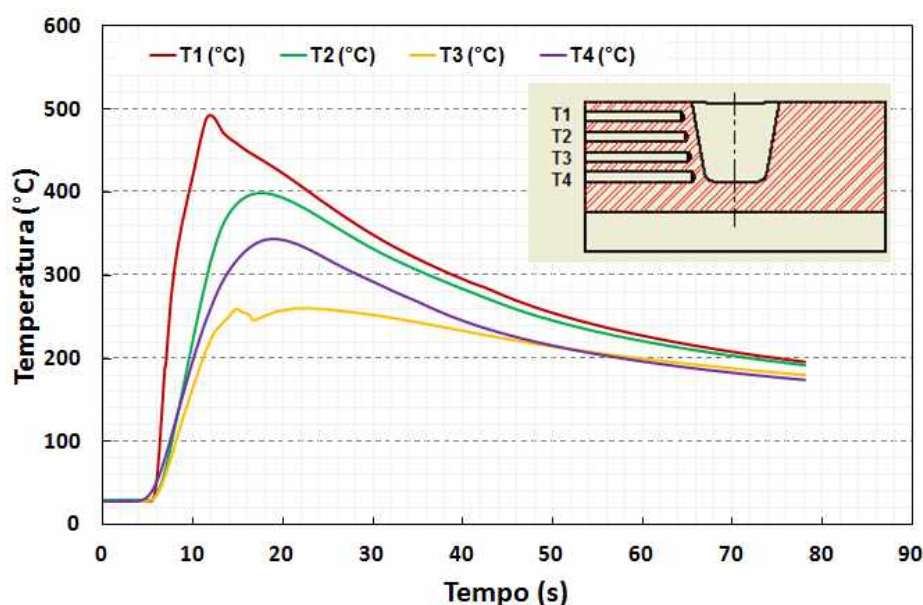


$$Energia\ de\ Soldagem\ [kJ] = \sum (Torque\ x\ Rotação) \times Tempo[s] \quad (3)$$

Em trabalho recente, Franco (2017), descreve com detalhes estudos em aços inoxidáveis duplex (AID) e superduplex (AISD) soldados pela técnica FTPW, variando força e profundidade do furo. Nas juntas soldadas de AID, ao utilizar os mesmos parâmetros de ensaio (força: 30 kN e comprimento de queima: 8 mm) e parâmetros geométricos similares, o autor encontrou valores de tempo de 8,6 segundos e energia de soldagem e 80,1 kJ, valor muito próximo ao encontrado neste trabalho.

#### 4.2. Tratamento e Análise dos Sinais Adquiridos de Temperatura

Os valores de temperaturas, coletados pelos termopares T1, T2, T3 e T4, posicionados em ordem crescente desde a superfície até o fundo do furo são mostrados na **Figura 32**.



**Figura 32:** Gráfico de temperatura em função do tempo da junta soldada (30 kN profundidade do furo 16mm)

No gráfico (**Figura 32**) observou-se que a temperatura se eleva gradualmente, da posição T4 até a posição T1, ou seja, o fluxo térmico é ascendente. No início do processo de soldagem, a amostra se encontra a temperatura ambiente; assim que ocorre o contato pino/metal base, o ponto T4 é o primeiro a se aquecer, e este não recebe calor de demais partes do metal base. Nas demais posições, T3 recebe calor de T4; T2 recebe calor de T3 e T1 recebe calor de T2. Desta forma, as temperaturas mais distantes do fundo do furo



tendem a ser cada vez maiores (GONTIJO, 2012). Porém, nota-se que o termopar T3 indicou temperaturas inferiores à T4 e isso possivelmente se deve à soldagem do termopar antes da posição adequada dentro do furo de 2 mm, distanciando-se da interface e indicando valores menores de temperaturas.

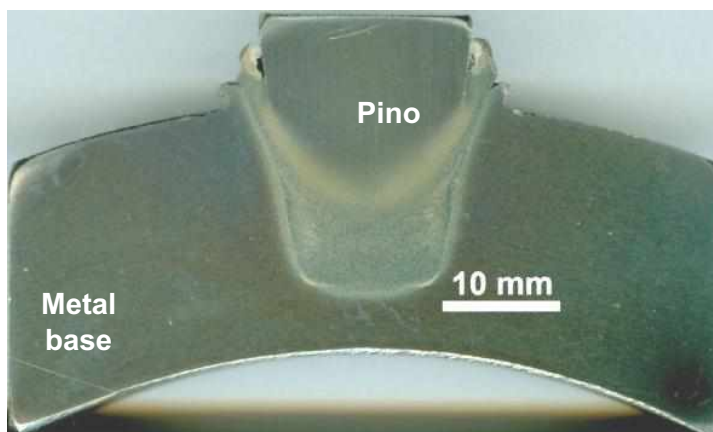
Neste ensaio não houve rompimento dos termopares. No entanto, observaram-se leves oscilações/perturbações ao longo da curva de temperatura indicada pelo termopar T3, que se devem à movimentação do termopar decorrente da deformação plástica na zona de ligação do pino e metal base.

A temperatura máxima do ensaio, obtida pelo termopar T1 posicionado a 2 mm da interface da junta soldada, foi de 492,1 °C. Em trabalhos realizados por Franco (2017), registra temperatura máxima de 764 °C, sob similares condições de ensaio (força: 30 kN e comprimento de queima: de 8 mm) e material utilizado (AID UNS S32205). A diferença entre os resultados obtidos e os valores encontrados na literatura pode ser proveniente do posicionamento dos termopares distante à interface da solda; das deformações plásticas do material durante o processamento do pino; e/ou das vibrações provenientes da máquina.

### 4.3. Caracterização Metalúrgica das Juntas Soldadas

#### 4.3.1. Macrografia

Nesta etapa, foi realizada uma análise da macroestrutura da solda, com o objetivo de analisar a qualidade da junta soldada e a extensão das Zonas Termo Mecanicamente Afetadas (ZTMA). A macrografia obtida ao longo da seção transversal da junta soldada é mostrada na **Figura 33**.

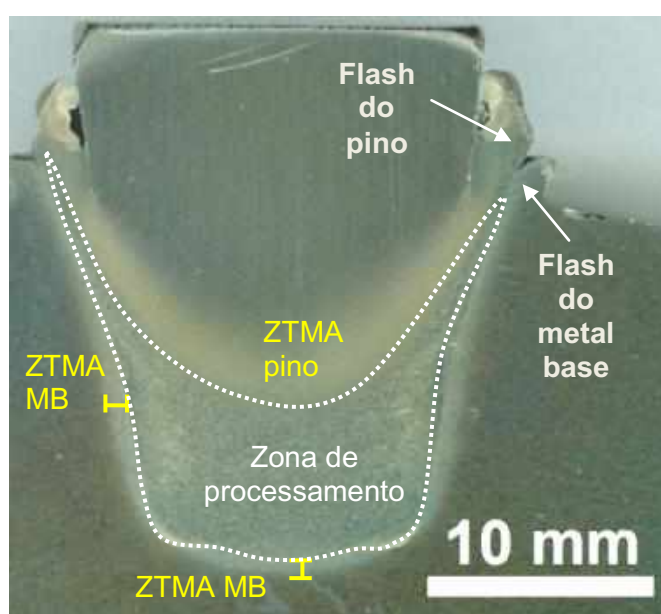


**Figura 33:** Macrografia da junta soldada

Na **Figura 33** visualiza-se a união entre pino e metal base, juntamente com a

formação de uma estreita ZTMA no metal base. Nesta imagem, verificou-se um preenchimento satisfatório da cavidade previamente usinada, e também não se visualiza presença de defeitos e descontinuidades na interface de soldagem.

As diferentes zonas afetadas no processamento na soldagem por atrito (ZTA pino, ZTA metal base, ZTMA pino e ZTMA metal base) foram descritas na revisão bibliográfica. Sendo assim, com a finalidade de caracterizar a macroestrutura da solda, foram realizadas medições da extensão da ZTMA no metal base e da área da zona de processamento do pino conforme mostra a **Figura 34**.



**Figura 34:** Regiões analisadas na macrografia

A extensão da ZTMA no metal base foi verificada tanto na região lateral quanto na região do fundo da solda, sendo obtidos os valores de  $0,9 \pm 0,1$  mm e  $0,65 \pm 0,1$  mm, respectivamente. Conforme visto na análise do ciclo térmico de soldagem (**Tópico 4.2**), os maiores valores de temperatura, foram adquiridos pelos termopares posicionados nas regiões superiores. Sendo assim verificou-se que ocorreu maior influência do calor na região lateral da junta soldada, quando comparado com a raiz da solda. Além disso, nota-se que para o material do pino e do metal base ocorreu a formação de flash (porção de material plastificado que se desloca para fora da cavidade da junta).

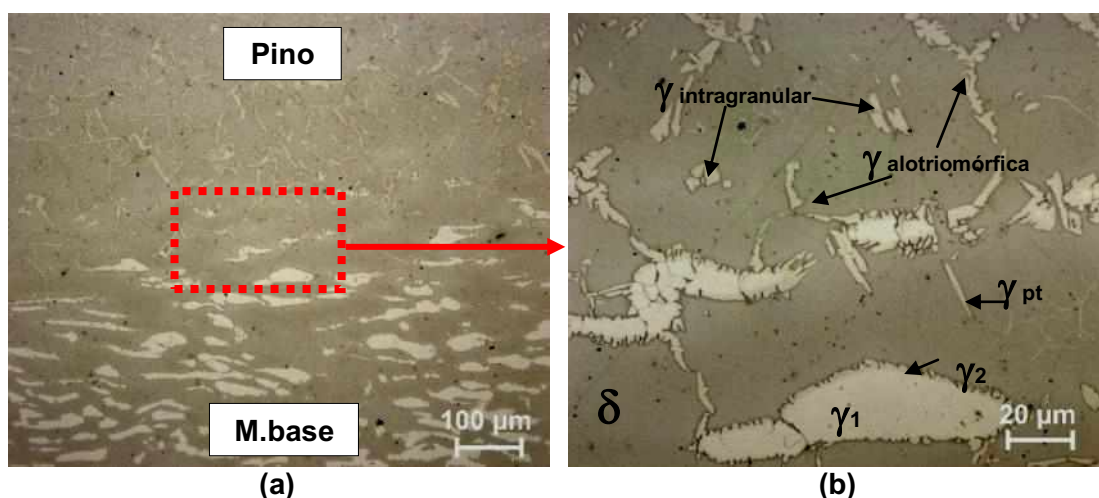
A quantificação da região da zona de processamento do pino foi efetuada através de medições de área, conforme ilustrado na **Figura 34**. Foram realizadas três medições, obtendo como valor de área igual a  $111,9 \pm 0,3$  mm<sup>2</sup>. Esta zona de processamento do pino (área preenchida) corresponde à 45 % do volume total da região soldada.

#### 4.3.2. Micrografia

As microestruturas das juntas soldadas nas posições de análise conforme o procedimento descrito no item 3.5.2 encontram-se no **APÊNDICE**.

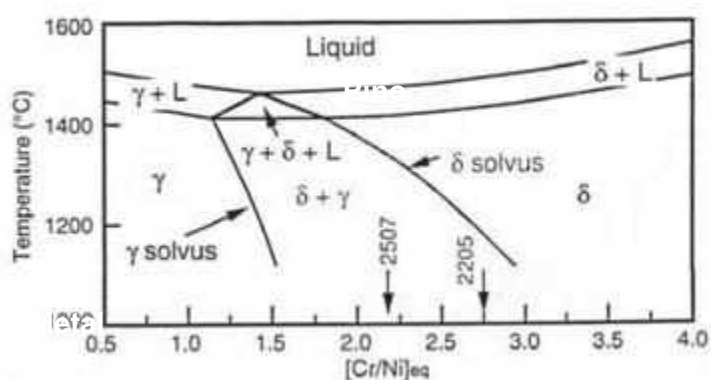
A microestrutura na posição **A (Figura 35)** corresponde à interface inferior pino/metal base no centro da junta soldada. Nesta é possível identificar a presença da matriz ferrítica ( $\delta$ ) e a fase austenítica ( $\gamma$ ) com diferentes morfologias:

- Intragranular ( $\gamma_{\text{intragranular}}$ ): que nucleia e cresce no interior da ferrita;
- Alotriomórfica ( $\gamma_{\text{alotriomórfica}}$ ): que cresce ao longo dos contornos de grão da ferrita;
- Parcialmente transformada ( $\gamma_{\text{pt}}$ ): que corresponde à austenita primária ( $\gamma_1$ ) parcialmente transformada durante o aquecimento (morfologia alongada e fina), normalmente presente na ZTMA do metal base;
- Austenita secundária ( $\gamma_2$ ), precipitada na ZTMA do metal base.



**Figura 35:** (a) Microestrutura da junta soldada na posição de análise A; (b) imagem anterior com maior aumento

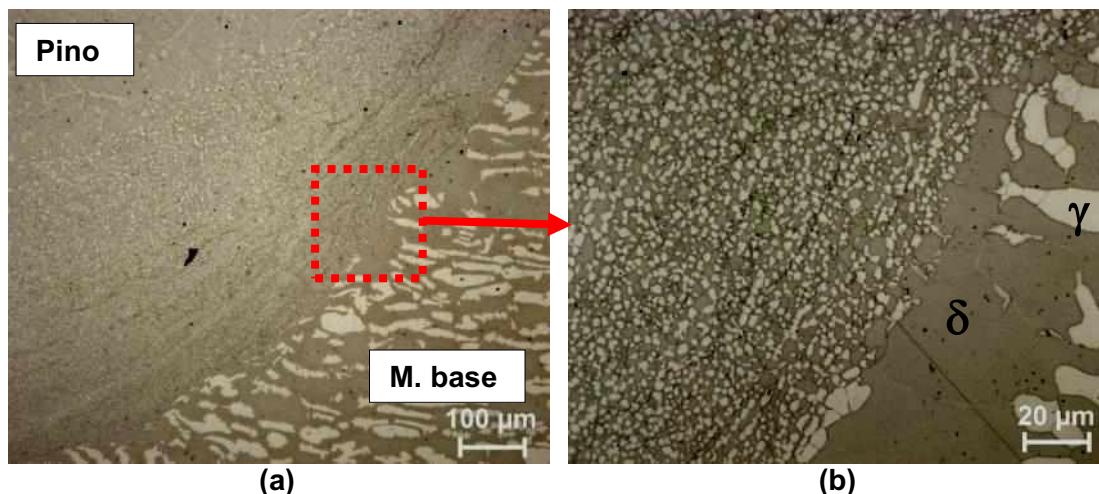
Em seus trabalhos, Machado (2016) estuda sequências de solidificação típicas de aços inoxidáveis e afirma que o modo de solidificação dependerá da relação entre os elementos de liga austenitizantes e ferritizantes, assim como da forma de resfriamento. O mesmo autor afirma que a precipitação e crescimento ocorre nos contornos de grãos da ferrita durante o resfriamento a partir de 1050 °C, temperatura acima da qual o material está totalmente ferritizado. Franco (2017) também observou que os processos de soldagem são executados sob influência de elevados ciclos térmicos, temperaturas em torno de 1000 °C a 1300 °C. Assim, dependendo do tempo de aquecimento, ocorre dissolução da fase austenítica e crescimento da fase ferrítica. A **Figura 36** ilustra o diagrama do AID duplex, indicando as temperaturas em que ocorrem as principais transformações de fases. Nele observa-se que, em torno de 1200 °C, ocorre ferritização total da liga UNS S32205 (SAF 2205).



**Figura 36:** Diagrama pseudobinário Fe-[Cr/Ni]<sub>eq</sub>. (VASCONCELLOS; ROSENTHAL; PARANHOS, 2010)

A **Figura 37 a** apresenta a microestrutura da junta soldada na posição **B**, que caracteriza o raio de concordância da raiz da solda. A microestrutura bifásica ferrítica-austenítica, característica do metal base não processado, é assim devido às temperaturas mais baixas na microestrutura do metal base nesta posição. Observa-se que as temperaturas atingidas nesta região não foram suficientes para promover alterações microestruturais significativas nesta região (raio de concordância).

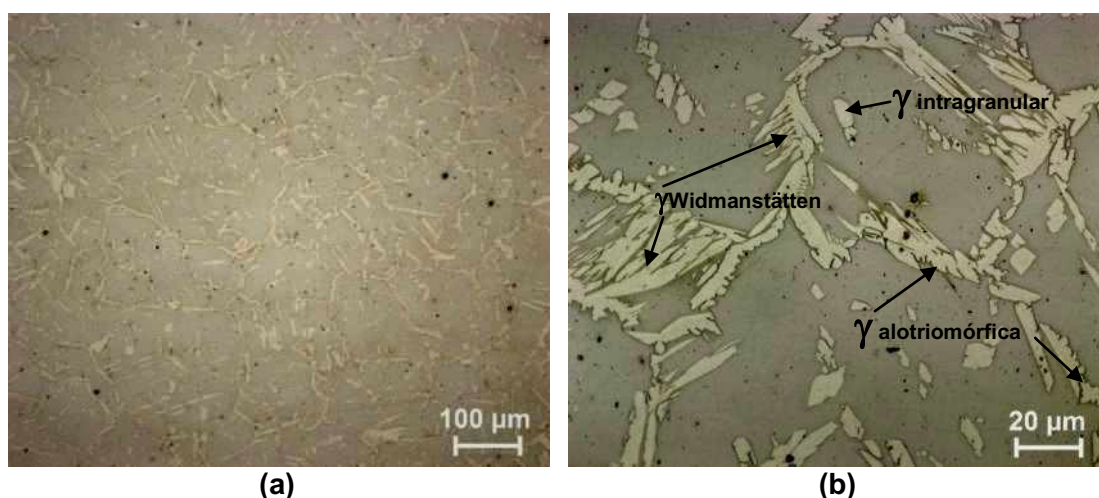
A **Figura 37 b** apresenta uma microestrutura bastante refinada na ZTMA, com predominância de austenita com morfologia idiomórfica refinada. Esta microestrutura é decorrente de uma possível recristalização dinâmica, ocorrida durante o processamento. No raio de concordância da junta soldada, houve uma intensa deformação mecânica em temperaturas baixas, indicada pela curva do termopar T4 (**Figura 32**). A elevada energia de deformação do material associada baixa energia térmica limita assim o crescimento difusional das fases (FRANCO, 2017). Em seus estudos, Machado (2016) afirma que esta região configura um entalhe metalúrgico, na qual existe pouca interação metalúrgica entre pino e metal base, devido a massiva plastificação do pino acompanhada da rápida extração de calor para o metal base.



**Figura 37:** Microestrutura da junta soldada na posição de análise B; **(b)** imagem anterior com maior aumento

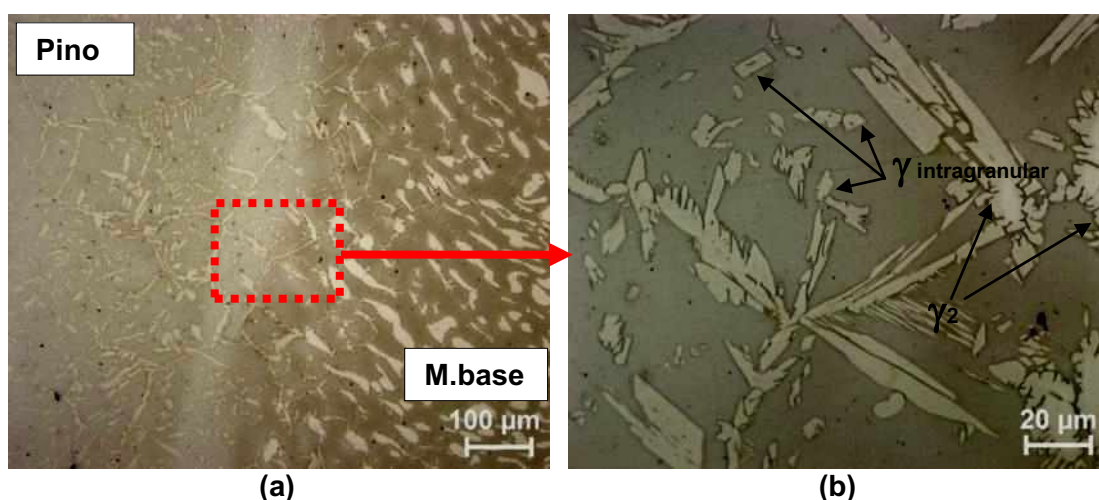
A microestrutura da região de análise **C** é mostrada na **Figura 38 a**. As características microestruturais desta região são similares àsquelas descritas na região do pino durante análise da região A. Na **Figura 38 b** observa-se com maiores detalhes a região central da solda composta por austenita alotriomórfica, intragranular e placas de Widmanstätten, microestrutura com formato de placas ou agulhas bastante finas, as quais nucleiam-se nos contornos da ferrita ou da austenita alotriomórfica pré-existente.





**Figura 38:** Microestrutura da junta soldada na posição de análise C; **(b)** imagem anterior com maior aumento

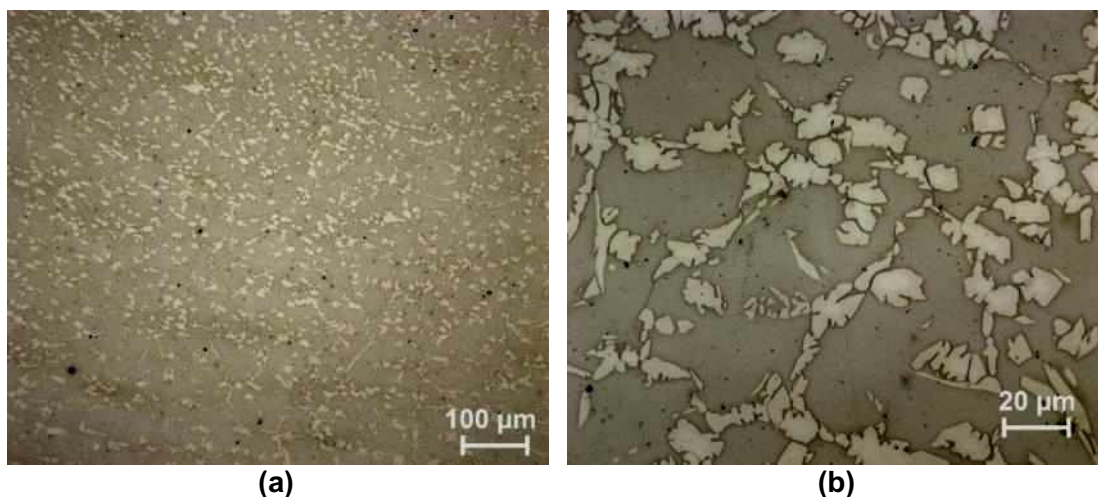
Na posição **D** (**Figura 39**), interface pino/metal base na metade da altura da junta soldada, a microestrutura apresenta um leve aumento no número de austenita intragranular e há precipitação de austenita secundária na ZTMA. Nesta posição, visualiza-se uma difusa interface entre a ZTMA do pino e ZTMA do metal base, sob qual a austenita surge nos contornos de grão na forma alotriomórfica, em placas de Widmanstätten e até mesmo em grãos intragranulares. Por fim, se visualiza uma mudança de orientação da microestrutura em função da deformação sofrida pela combinação de esforços exercidos pela força axial associada à rotação, resultando em um fluxo ascendente de material (MACHADO, 2016).



**Figura 39:** Microestrutura da junta soldada na posição de análise D; **(b)** imagem anterior com maior aumento

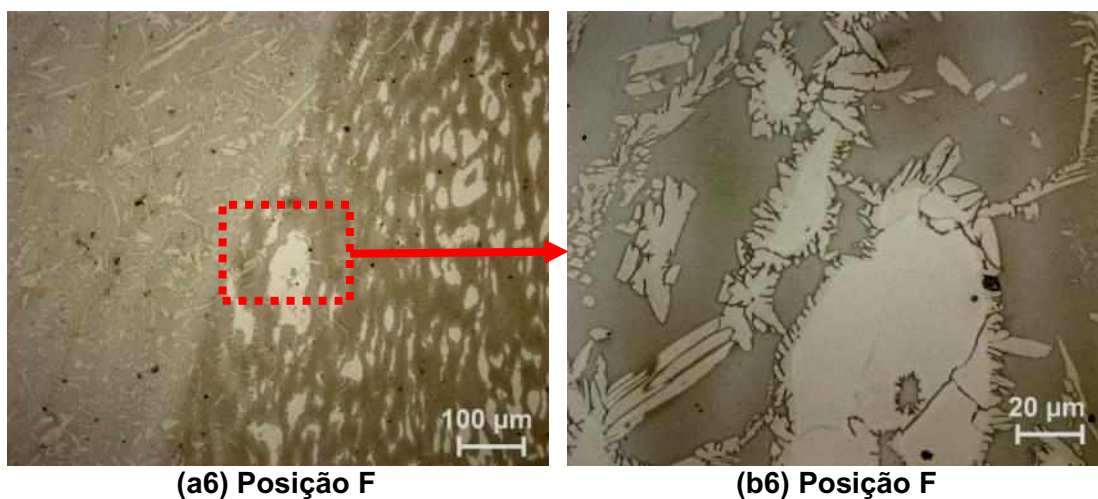
A microestrutura da região **E**, correspondente à região central da junta soldada no final da zona de processamento do pino é mostrada na **Figura 40**. Esta região é caracterizada pela transição entre as zonas afetadas e não afetadas termicamente. Nesta

posição identifica-se que alguns grãos de austenita apresenta transformação parcial, ou seja, o tempo e a temperatura de aquecimento durante o processo foram insuficientes para que ocorresse a completa dissolução da austenita na ferrita.



**Figura 40:** Microestrutura da junta soldada na posição de análise E; **(b)** imagem anterior com maior aumento

A **Figura 41** mostra a região **F** da junta soldada, correspondente a interface pino/metal base a 2 mm do topo da junta soldada. As características microestruturais desta região são similares às da região **D**.

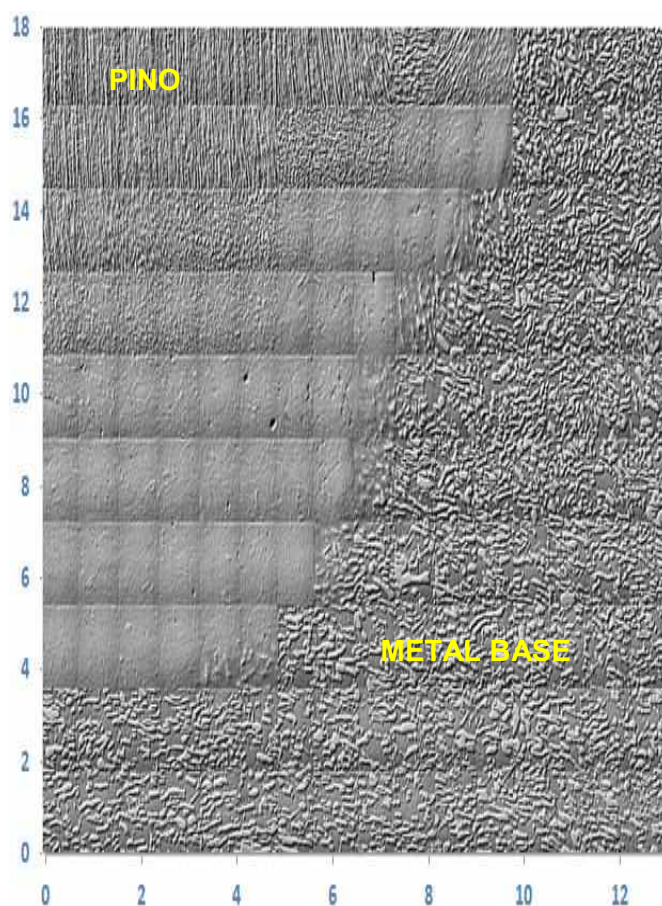


**Figura 41:** Microestrutura da junta soldada na posição de análise F; **(b)** imagem anterior com maior aumento

#### 4.3.3. Quantificação Volumétrica das Fases Ferrítica e Austenítica

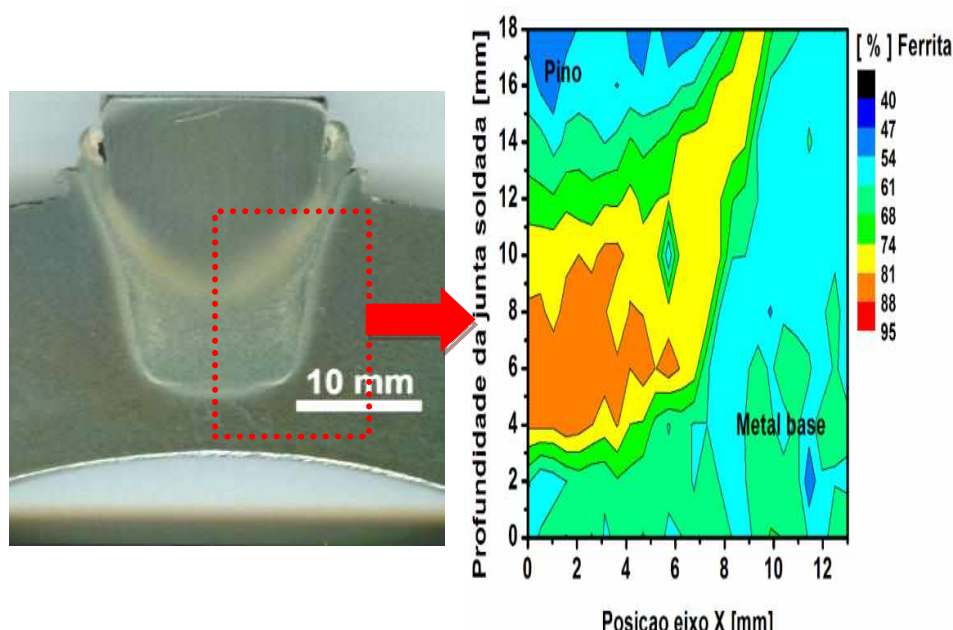
A quantificação das fases, ferrita e austenita, foi avaliada conforme mostrado na

**Figura 19.** Para isto, foi necessário o registro em diferentes ampliações por haver grande diferença de tamanho da microestrutura em cada zona. O conjunto das imagens obtidas em microscópio óptico é mostrado na **Figura 42**. A partir dessas imagens foi realizada a quantificação das fases na junta soldada e o resultado do balanço ferrita (fase escura) - austenita (fase clara) é mostrado na **Figura 43**.



**Figura 42:** Conjunto de imagens obtidas para realização de metalografia quantitativa, eixos indicando posição em [mm]





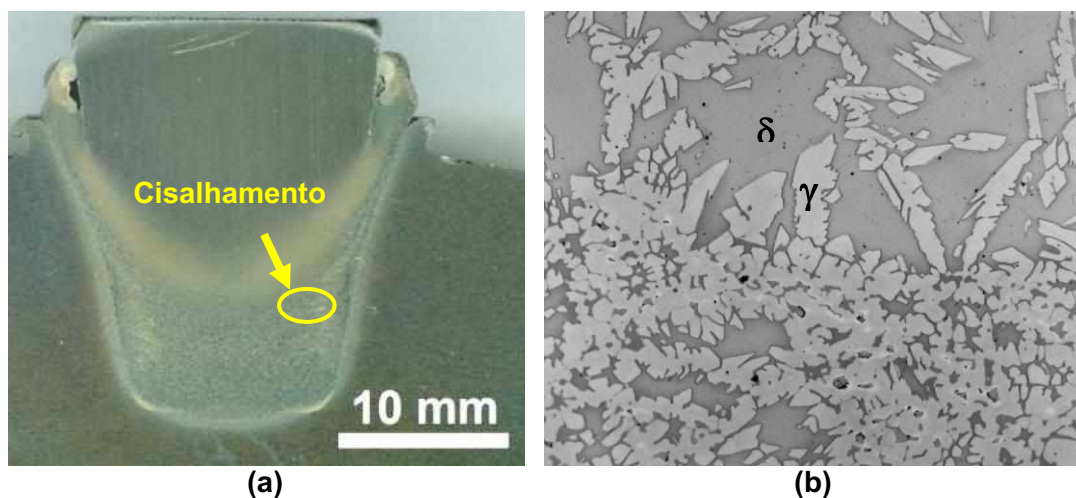
**Figura 43:** Fração volumétrica de fases da junta soldada

Analisando a **Figura 43**, verificou-se nas regiões com menor influência do processo de soldagem, valores de ferrita entre 48 % e 68 % no metal base e valores de ferrita entre 49 % e 58 % na região superior do pino. Em estudos recentes, Franco (2017), obteve valores máximos de ferrita de 60 % nas regiões com menor efeito do processo de soldagem (em junta soldada AID com profundidade de solda 15 mm e força axial 30 kN). Assim, tem-se que os resultados obtidos são próximos às frações volumétricas das fases de juntas soldadas em AID encontradas na literatura.

Há um desequilíbrio entre fases na zona processada e na ZTMA. Na região da zona processada a fração volumétrica da fase ferrítica é maior quando comparada a fase austenítica (valores de ferrita entre 70 % e 87 %). Estes resultados não estão condizentes com o esperado para as ligas de AID, as quais devem apresentar proporções aproximadamente iguais entre ferrita e austenita (ASTM A995/995M, 2016). O desequilíbrio entre fases nos AID proporciona a variação nas propriedades mecânicas como diferentes durezas, resistência mecânica e resistência à corrosão destes materiais. Nota-se também um gradiente no desbalanceamento; este se torna maior na medida em que se aproxima da região de processamento do pino. Segundo Machado (2016), é esperado que a soldagem por atrito realizada em aços inoxidáveis duplex apresente uma tendência a ferritização da junta soldada, corroborando, assim, os resultados encontrados.

Além disso, existe uma região pontual na zona de processamento do pino com baixo teor de ferrita (valor entre 54 % e 61 %), coincidente com a região cisalhada do pino na junta soldada (**Figura 44**). Franco(2017) avaliou a influência da força axial nas juntas soldadas em AID, e em seus resultados verificou a presença deste tipo de cisalhamento em soldas

realizadas com força de 30 kN.



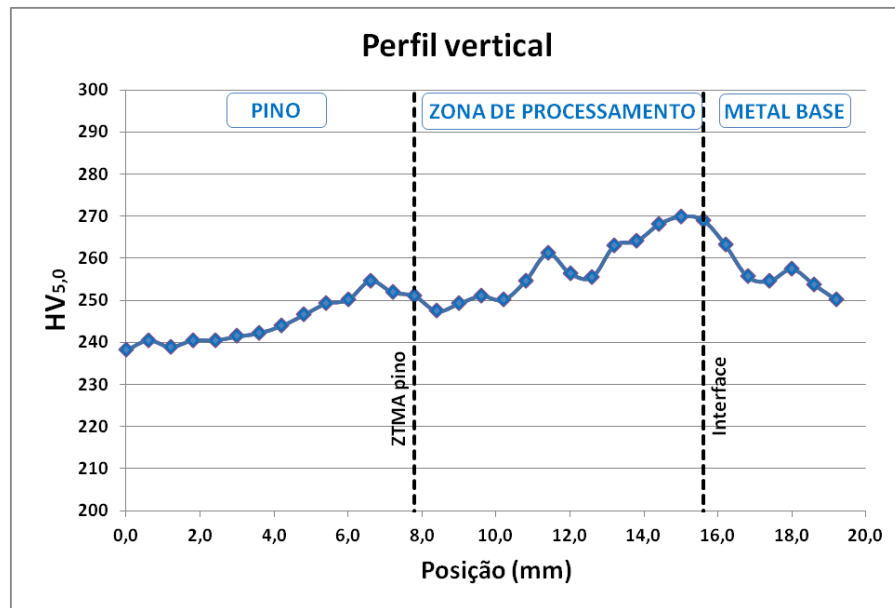
**Figura 44:** (a) Região cisalhada do pino, (b) microestrutura na região cisalhada, com 55 % de ferrita

Em geral, as propriedades mecânicas dos AID estão ligadas à proporção entre fases ferrítica e austenítica. Enquanto o aumento da primeira promove redução na tenacidade e resistência à corrosão, a redução da mesma pode ocasionar diminuição da resistência mecânica e possível falha por corrosão sob tensão (MACHADO, 2016).

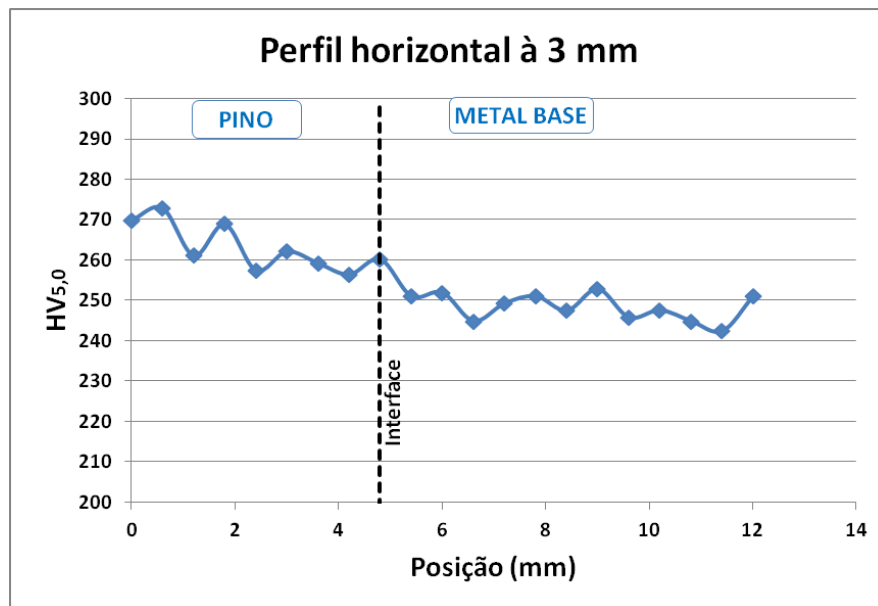
#### 4.4. Ensaio de Dureza Vickers

##### 4.4.1. Macro dureza

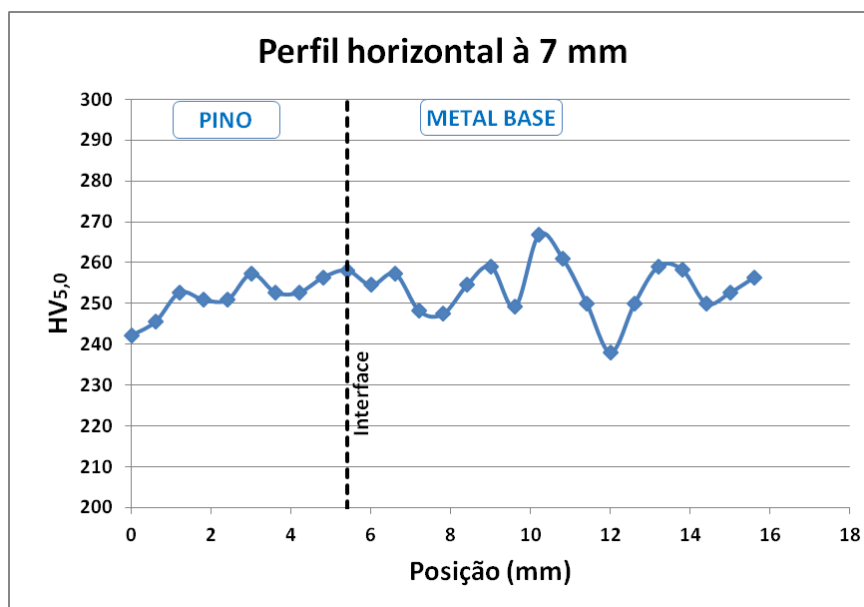
Com objetivo de verificar variações de durezas em cada zona/região da junta soldada, foram realizados três perfis (vertical, horizontal a 3 mm e horizontal a 7 mm) na amostra. Os perfis de durezas são mostrados nas **Figura 45** a **Figura 47**.



**Figura 45:** Perfil de dureza vertical



**Figura 46:** Perfil de dureza horizontal a 3 mm

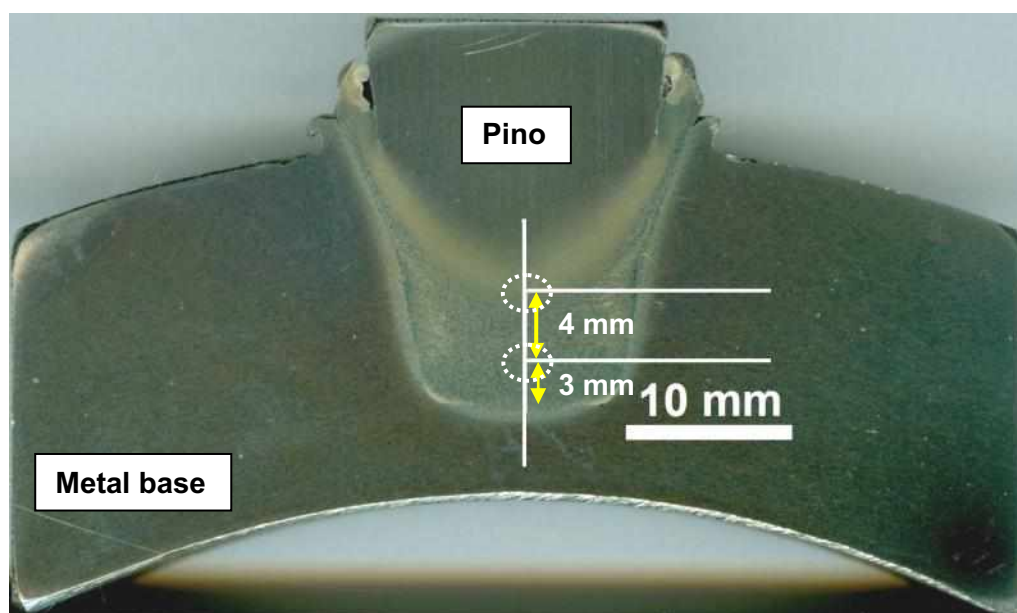


**Figura 47:** Perfil de dureza horizontal a 7 mm

De modo geral, os perfis apresentaram valores de dureza menores do que o valor máximo de 290 HBW (306 HV), para a liga UNS S32205 estabelecido pela norma ASTM A276/A276M (2016).

No perfil vertical (**Figura 45**), os valores iniciam em torno de 240 HV (região do pino com pouca influência do processo de soldagem). Ao se deslocar no sentido pino-metal base, nota-se uma pequena elevação dos valores da dureza (em torno de 30 HV) na região da zona de processamento. E, por fim, observa-se uma queda dos valores de dureza na região da interface até atingir a região do metal base (250 HV).

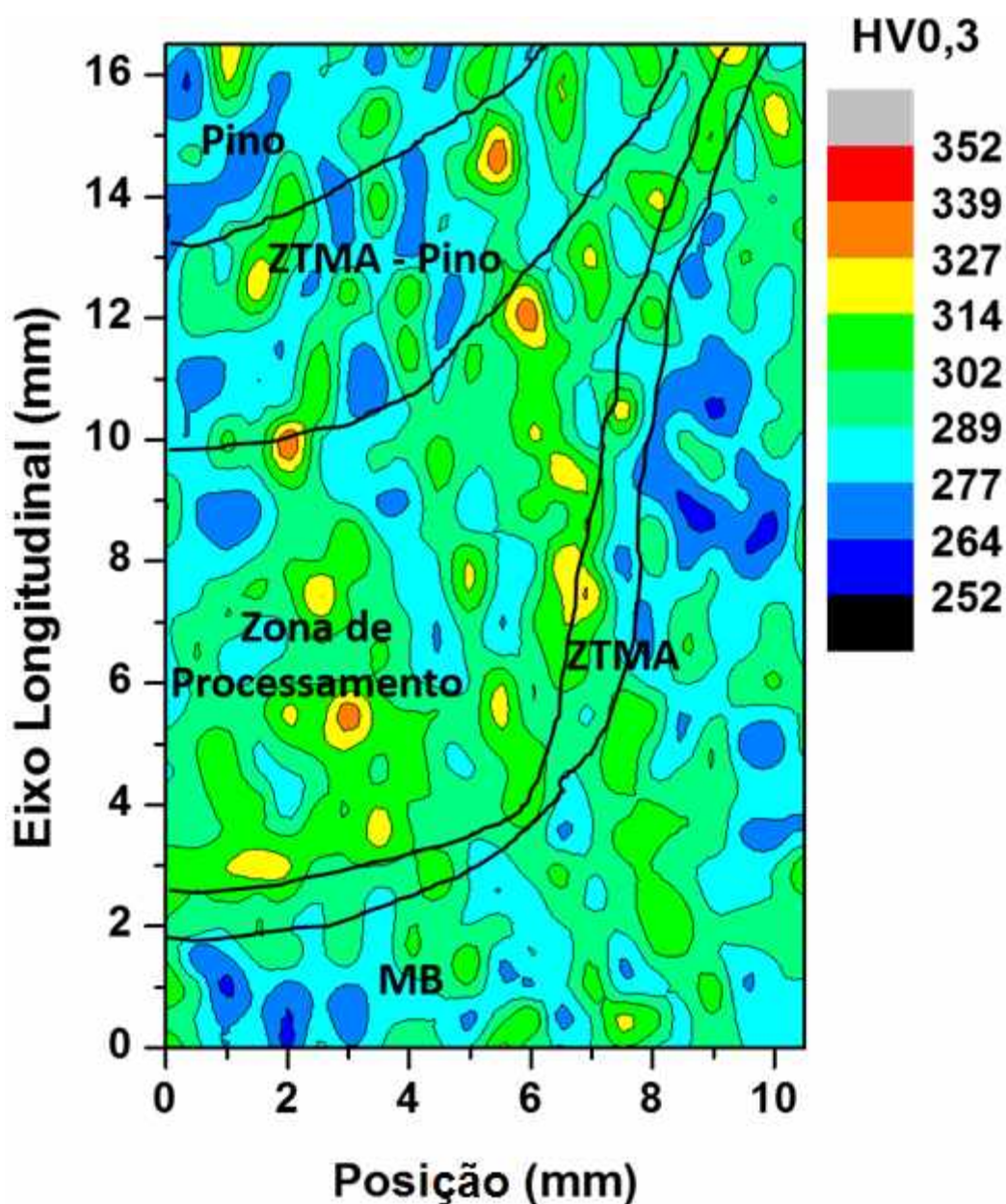
Nos perfis horizontais (**Figura 46 e Figura 47**), ocorre uma variação significativa da dureza. Os valores se encontram em uma faixa de dureza entre 238 HV<sub>5,0</sub> e 272 HV<sub>5,0</sub>. O perfil horizontal a 3 mm se assemelha ao comportamento da porção final do perfil vertical, visto que ambos se iniciam na região de zona de processamento do pino e finalizam na região do metal base. Na região do pino, a diferença entre o comportamento dos perfis de horizontais é justificada pela microestrutura da região. No perfil horizontal a 3 mm, as indentações iniciam-se dentro da zona de processamento, região com maiores valores de dureza, enquanto no perfil horizontal a 7 mm inicia-se na ZTMA do pino, região com menores valores de dureza, conforme mostra a **Figura 48**.



**Figura 48:** Início dos perfis de dureza horizontais

#### 4.4.2. Microdureza

Após as medições de macrodureza na junta soldada, foi realizado o mapa de microdureza aproveitando a simetria da junta soldada, mostrado na **Figura 49**. Analisando a imagem, observa-se uma tendência dos maiores valores de dureza se encontrarem na região processada. Picos de dureza (valores entre 339 HV e 352 HV) foram encontrados nesta região. Estes valores são superiores, em torno de 50 HV, aos valores observados no metal base e região do pino não processada.



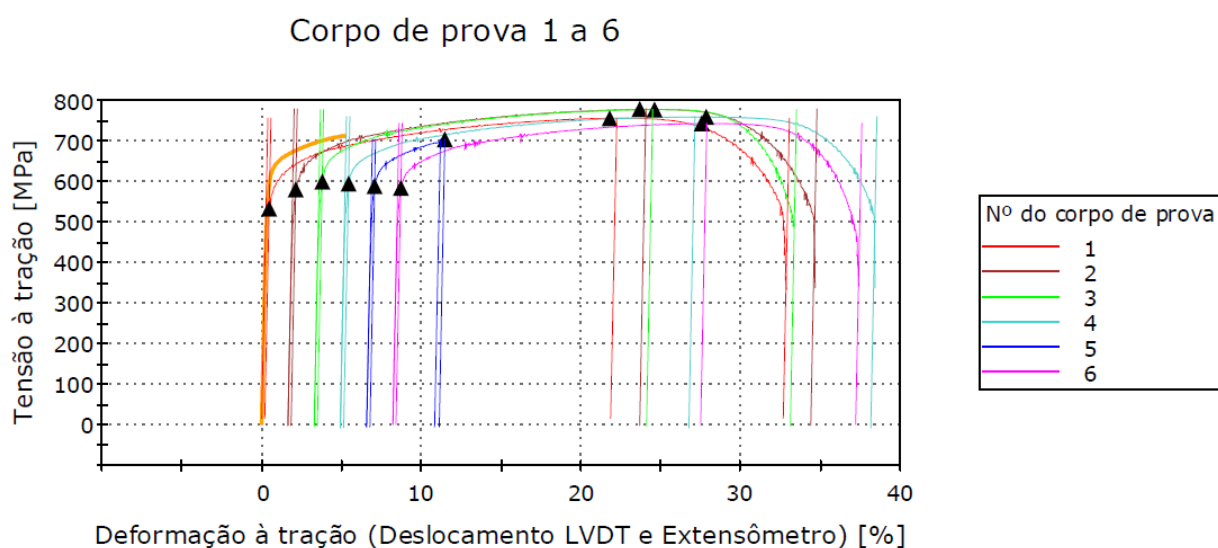
**Figura 49:** Mapa de microdureza

Lessa (2016) analisou soldas por atrito em AID SAF 2205 (UNS S32205), variando parâmetros de ensaio. Em um de seus resultados (amostra soldada com força de 25 kN), ele encontrou uma baixa variação (30 HV) nos valores de microdureza entre as regiões. Os valores máximos de dureza (em torno de 280 HV) se encontravam na região processada. O mesmo autor justifica o aumento da dureza na região processada pela formação de austenita com morfologia de Widmanstätten e a austenita secundária presente na região processada.



#### 4.5. Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração foram obtidos a partir de ensaios realizados em corpos de prova retirados na direção longitudinal do tubo e transversal à solda. As curvas tensão x deformação de engenharia referente ao ensaio de tração para todas as amostras (numerados de 1 a 6) são mostrados na **Figura 50**.



**Figura 50:** Curvas tensão x deformação

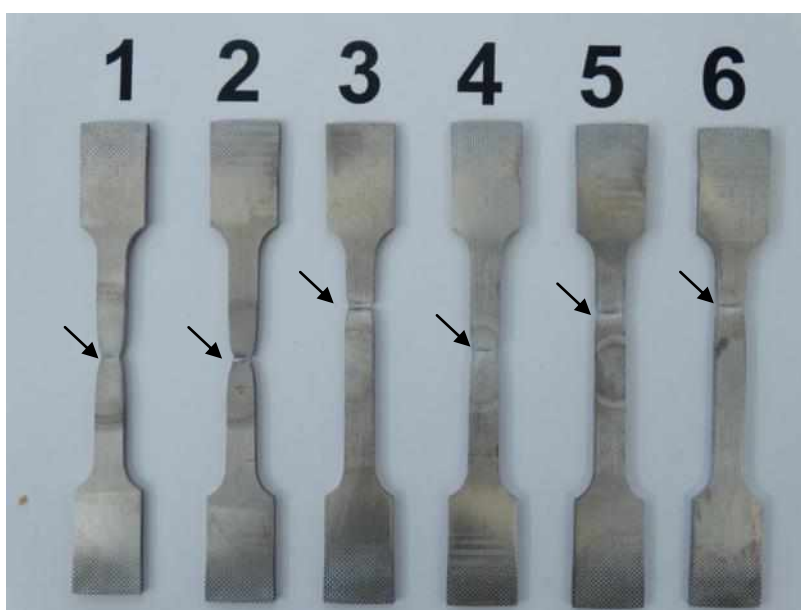
Analisando a **Figura 50** não se percebem alterações significativas quanto ao formato das curvas. A curva do corpo de prova nº5 foi interrompida, pois houve uma falha no processo de remoção do extensômetro durante a realização do ensaio, permitindo apenas coletar os dados durante fase elástica.

A **Tabela 7** complementa as informações do ensaio de tração, onde se tem os valores das propriedades mecânicas obtidas: módulo de elasticidade, limite de escoamento, e limite de resistência. Analisando os resultados, observa-se que os valores de limite de escoamento e resistência na junta soldada são superiores aos valores mínimos indicados na Norma ASTM A276/276M (2016) para a liga UNS S32205.

**Tabela 7:** Propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade [ GPa]	Limite de escoamento [MPa]	Limite de Resistência à Tração [Mpa]
1	190,42	532,98	754,81
2	202,19	580,24	777,29
3	198,61	598,76	776,05
4	197,58	594,56	758,05
5	193,86	588,53	-
6	191,97	583,41	742,28
<b>Média</b>	<b>195,77</b>	<b>579,75</b>	<b>761,70</b>
<b>Des.Pad.</b>	<b>4,46</b>	<b>23,91</b>	<b>14,89</b>
<b>*UNS S32205</b>	<b>200 mín.</b>	<b>450 mín.</b>	<b>655 mín.</b>
(*) especificações da norma ASTM A276/A276M para o aço UNS S32205			

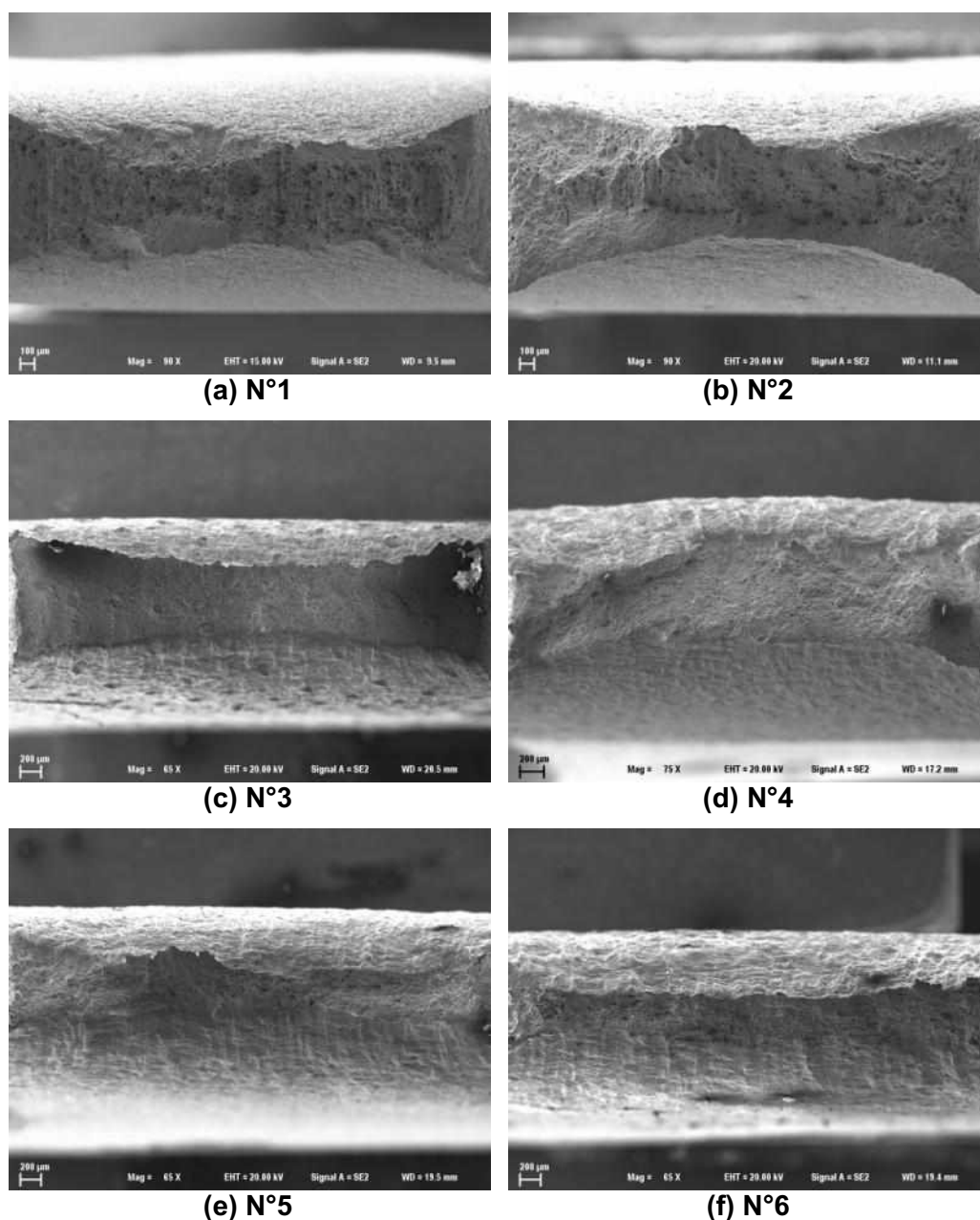
A **Figura 51** mostra os corpos de provas após o ensaio de tração. Observa-se que o material se deforma substancialmente antes de fraturar, havendo uma estricção antes da fratura. Também nota-se que não houve um lugar específico para que a fratura ocorresse. Os corpos de provas 1, 2 e 4 romperam na região da solda e os demais no metal base. Isto indica que não houve ganho de resistência mecânica na região da solda, ou seja, as propriedades mecânicas são similares a região do metal base.

**Figura 51:** Corpos de prova após ensaio de tração, com marcações indicando o local da fratura



Analisando a **Tabela 7** juntamente com a **Figura 51**, foi observado que não houve correlação entre o local de ocorrência da fratura e a posição do corpo de prova ao longo da junta soldada. Os valores de propriedades mecânicas encontrados para cada corpo de prova são similares, justificado pelos baixos valores do desvio padrão indicados na tabela.

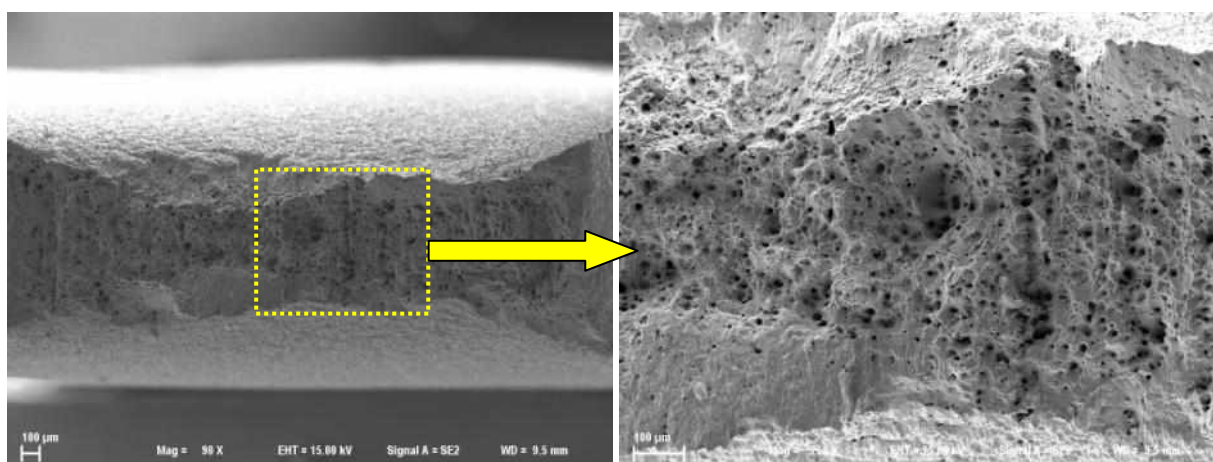
Uma análise fractográfica das amostras ensaiadas à tração foi realizada via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Imagens obtidas com menores ampliações para caracterização das fraturas são apresentadas na **Figura 52**.



**Figura 52:** Seções transversais das amostras analisadas em MEV

Na **Figura 52**, não se visualizam diferenças significativas quanto ao aspecto geral

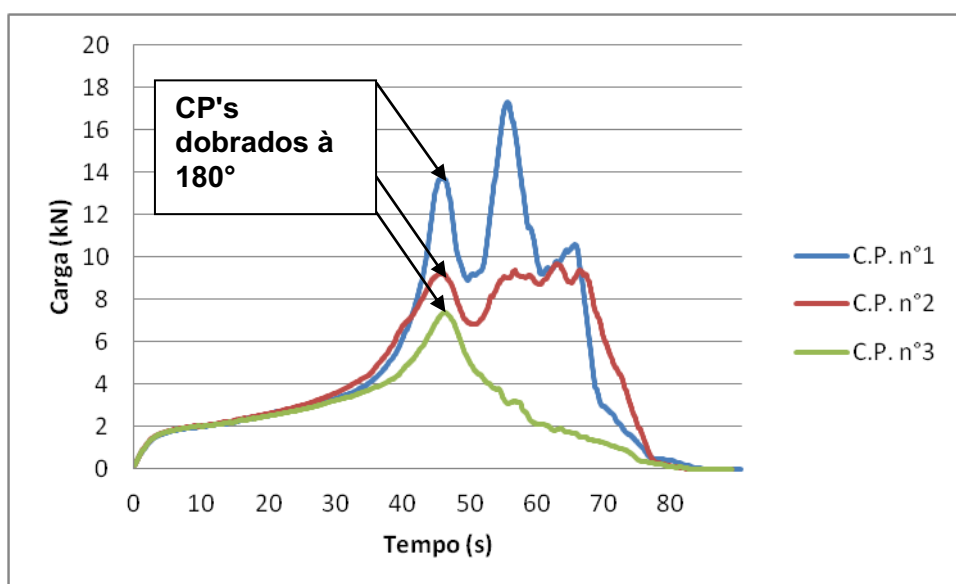
das fraturas. Todas as amostras apresentaram uma fratura dúctil, ocorrendo após um extensa deformação plástica, caracterizada pela nucleação e crescimento das microcavidades no material (**Figura 53**). Além disso, em nenhuma amostra foi observada a presença de inclusões.



**Figura 53:** Nucleação e crescimento das microcavidades no material

#### 4.6. Ensaio de Dobramento

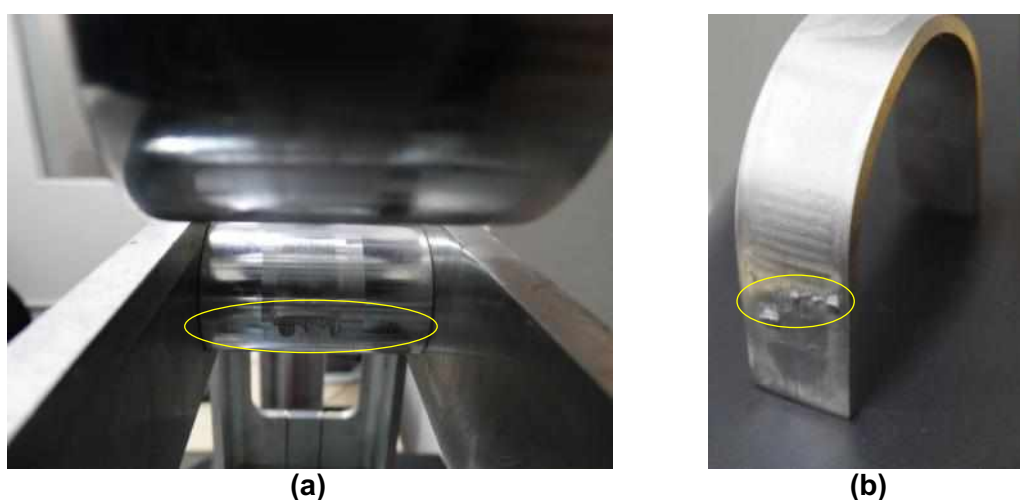
Com a finalidade de verificar a ductilidade e qualidade da região soldada, foram realizados ensaios de dobramento lateral em amostras das juntas soldadas, conforme descrito no item 3.8. As curvas referentes ao ensaio de dobramento instrumentado dos três corpos de prova são mostradas na **Figura 54**.



**Figura 54:** Curvas do ensaio de dobramento

Nas três curvas da **Figura 54**, observa-se o aumento da carga aplicada ao longo do tempo, até atingir o primeiro pico (instante em que o corpo de prova se encontra dobrado a  $180^\circ$ ). Após este pico, as curvas apresentaram comportamentos distintos.

O primeiro ensaio (CP n°1) foi realizado a seco (na ausência de lubrificação entre as superfícies em contato da amostra e do rolete do equipamento), o que implicou no aumento da força/carga mostrado nas curvas. O elevado atrito entre as superfícies associado ao bom acabamento superficial do corpo de prova e dos roletes, levou à adesão entre estes e ao destacamento de material dos roletes, conforme mostrado na **Figura 55**.

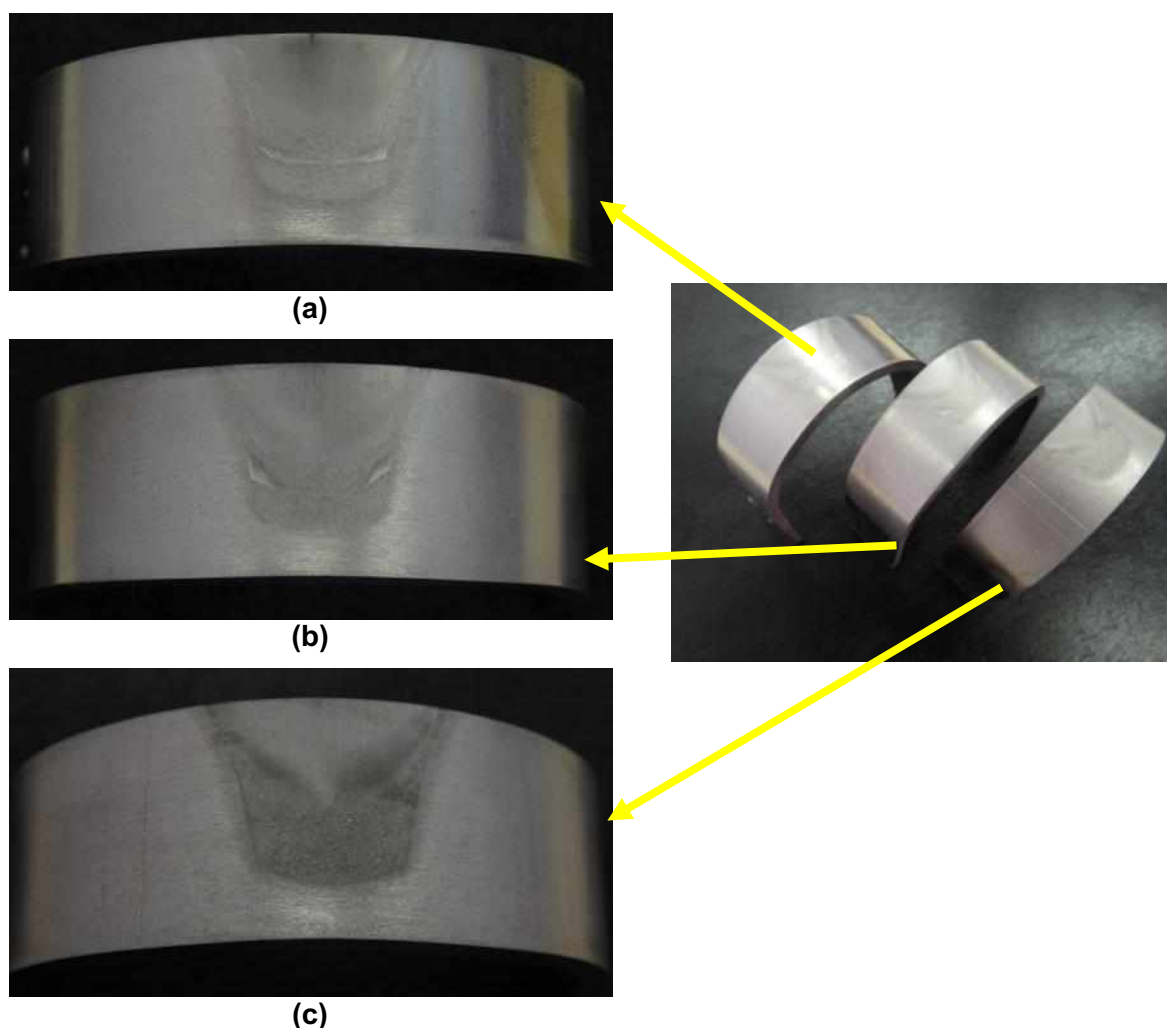


**Figura 55: (a)** Perda de material do rolete, **(b)** material do rolete aderido ao corpo de prova

Anterior à realização do segundo ensaio (CP n°2), houve a substituição dos roletes danificados. O segundo ensaio também foi executado sem lubrificação entre os roletes e a amostra. Quando comparadas ao primeiro ensaio, as oscilações de carga na curva referente ao CP n°2 (após o dobramento a  $180^\circ$ ) foram menores. Isto possivelmente se deve à dureza adequada dos roletes substituídos, já que não houve danos aos roletes ao final do segundo ensaio.

E, por fim, no terceiro ensaio (CP n°3) houve uma lubrificação do sistema anterior a execução do procedimento experimental, reduzindo assim os efeitos do atrito após o dobramento a  $180^\circ$  do corpo de prova.

Como resultado desta etapa, todos os corpos de prova ensaiados foram dobrados à  $180^\circ$ , sem ocorrer formação de trincas durante o ensaio, ou seja, apresentaram uma boa utilidade da região soldada (**Figura 56**).



**Figura 56:** Corpos de prova após ensaio de dobramento (a) n°1, (b) n°2 e (c) n°3

Em seus estudos, Lessa (2016) realizou soldas por atrito Friction Hydro Pillar Processing em aço inoxidável duplex (SAF 2205), variando parâmetros, de força velocidade de rotação e comprimento de queima. Nos testes de dobramento realizados, o autor não encontrou qualquer tipo de descontinuidade após o dobramento. Piza (2013) realizou ensaios de dobramento em aços inoxidáveis austeníticos soldados pela técnica FTPW. Em seus estudos, o autor variou a força de 50 kN a 400 kN e obteve o dobramento a 180° em todos ensaios. Quando comparado o aço inoxidável austenítico, ao AID, este último apresenta maior resistência à tração e maior limite de escoamento, (conforme mostra a **Tabela 1**).

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÕES**

Neste trabalho foram realizadas análise e medição do ciclo térmico de soldagem, macrografia, micrografia, metalografia quantitativa, ensaios de macro e microdureza, tração e dobramento. Os resultados obtidos a respeito da microestrutura e das propriedades mecânicas avaliadas em juntas soldadas de aço duplex pelo processo FTPW permitem concluir que:

- O processo de soldagem ocorreu em aproximadamente 8,0 segundos, e a energia de soldagem foi de 77,5 kJ;
- Os valores de temperatura foram influenciados pela movimentação da interface pino/metal base, gerando uma certa imprecisão nos valores obtidos. Os maiores valores de temperaturas foram registrados pelos termopares posicionados nas regiões superiores;
- Na etapa da macrografia, observou-se ausência de falhas e defeitos na interface pino/metal base. A ZTMA do metal base é estreita e com baixa modificação da microestrutura do metal base;
- A região de processamento do pino ocupa 45 % do volume total da região soldada;
- A microestrutura foi analisada e caracterizada com detalhes em cada região especificadamente da junta soldada. Foi observada uma modificação na morfologia da austenita sendo composta por: austenita intragranular, austenita alotriomórfica, austenita com morfologia parcialmente transformada, austenita secundária, e placas de Widmanstätten;
- No raio de concordância da raiz da junta soldada há predominância de uma

microestrutura (austenita) mais refinada resultante de uma recristalização dinâmica ocorrida durante o processo;

- Na junta soldada, foi observada nas regiões do metal base e porção superior do pino, valores de fração volumétrica de ferrita entre 40 % e 60 %, conforme estabelecido em norma. Já a região da zona de processamento do pino apresenta maiores frações volumétricas de ferrita, entre 60 % e 90 %;
- Nos perfis de macrodureza foi possível observar variação nos valores de dureza sendo maiores na zona de processamento do pino (em torno de 270 HV), com decréscimo destes valores partir do momento que se estendiam no sentido do metal base. Os valores de dureza encontrados foram todos menores que o valor máximo estabelecido em norma para a liga em estudo;
- O mapeamento da microdureza permitiu avaliar com uma visão mais detalhada toda a região da junta soldada, caracterizando os valores de dureza na zona de processamento do pino, corroborando os resultados da macrodureza (maiores valores na zona de processamento quando comparada às demais regiões);
- Na junta soldada, os valores das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tração foram superiores ao mínimo estabelecido em norma. Nas amostras retiradas ao longo da profundidade da solda, foram observadas rupturas, tanto na região da solda, quanto no metal base. Não foi possível obter uma correlação entre o local de ocorrência da fratura e a posição do corpo de prova ao longo da junta soldada. Observou-se também entre elas um comportamento similar quanto ao aspecto geral das fraturas (fratura dúctil).
- Todas as juntas soldadas foram dobradas à 180 graus, sem ocorrer a formação de trincas e apresentando assim um comportamento dúctil.

Recomenda-se para trabalhos futuros, a avaliação dos seguintes tópicos relacionados à utilização de juntas FTPW:

- Melhorar a fixação dos termopares durante a avaliação do ciclo térmico;
- Executar ensaios charpy (escala macro e micro), ensaios de dobramento com

maior severidade e avaliar resistência à corrosão do material AID UNS S32205 visando aplicações em ambiente marinho;

- Avaliar tenacidade à fratura da junta soldada através de ensaios CTOD.

# CAPÍTULO VI

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM 276/276M. **Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.** p1-8, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM A890/A890M. **Standard Practice for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum Corrosion Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application.** p.556-569, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM A995/995M. **Standard Specification for Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steel, for Pressure-Containing Parts.** p1-4, 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E190-14. **Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.** p1-4, 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E8/E8M-15a. **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials.** p1-29, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E92. **Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.** p 1-27, 2017.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS Welding Handbook. **Friction Welding – Definition and Process Variations,** p. 740-763, 1991.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWSB4.0-98. **Standard Methods for Mechanical Testing of Welds.**p1-108, 1998.

ARTHUSO, E. C. M. **Influência da Taxa de Deformação e da Temperatura na Ductilidade a Quente do Aço Inoxidável Duplex UNS S32304.** 2013. 101 f. Dissertação



de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FRANCO, S. D. **Reparo por Soldagem no Estado Sólido**. Uberlândia, 2017. Relatório Técnico Parcial Interno, LTAD.

GONTIJO, M. F. **O Efeito da Espessura da Chapa Sobre a Qualidade do Reparo por Atrito**. 2012. 130 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LESSA, C. R. L. **Qualificação Mecânica e Metalúrgica do Processo de Soldagem FHPP Aplicado no Aço Inoxidável Duplex SAF 2205**. 2016. 123 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOUREIRO, J. P. **Caracterização do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 pela Técnica Não Destrutiva de Correntes Parasitas Pulsadas**. 2010. 101 f. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MACHADO, R. B. **Efeitos do Processo de Soldagem por Fricção com Pino Consumível Sobre a Microestrutura de um Aço Inoxidável Dúplex UNS S31803**. 2016. 103 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARTINS, M.; CASTELETTI, L. C. **Aços inoxidáveis duplex e super duplex—obtenção e caracterização**. Revista Fundição e Serviços, ano 17, nº 169, 2007.

MEINHARDT, C. P. **Caracterização Microestrutural de Solda por Fricção em Aço Inoxidável Austenítico (UNS S31673) e Aço Inoxidável Duplex (UNS S31803)**. 2013. 116 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PAES, M. T. P. **Processamento Termomecânico de Pinos de Aço no Interior de Cavidades de Aço C-Mn Através de Soldagem por Atrito Rotacional** 2013. 332 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PIRES, R. R. **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. 2007. 155 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

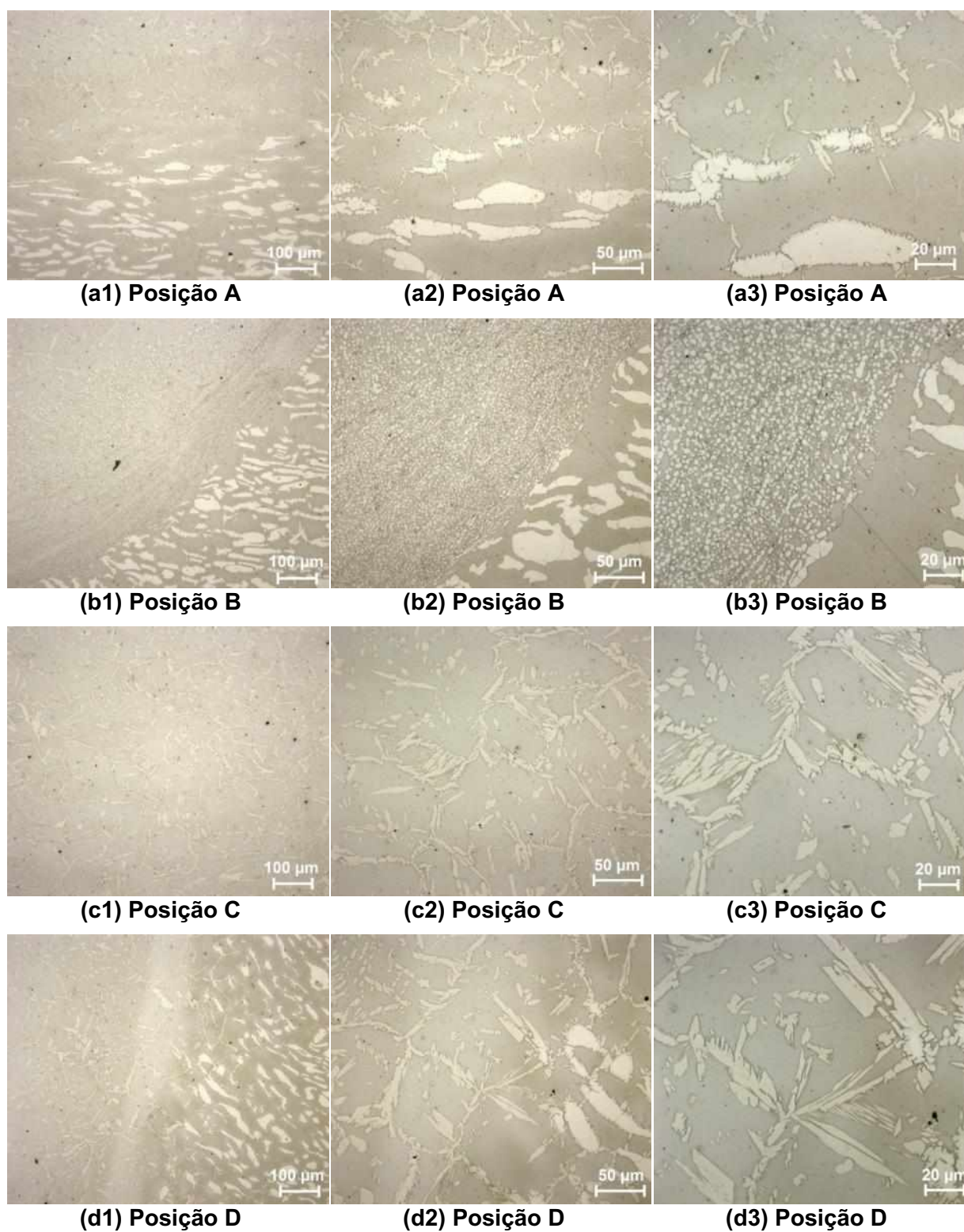
RODRIGUES, F. B. **Desenvolvimento, Projeto e Construção de Sistemas e Acessórios Mecânicos Destinados à Automação de um Cilindro de Reparo por Atrito.** 2016. 191 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SABARA, E. W. F. **Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais.** 2013. 158 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del Rei.

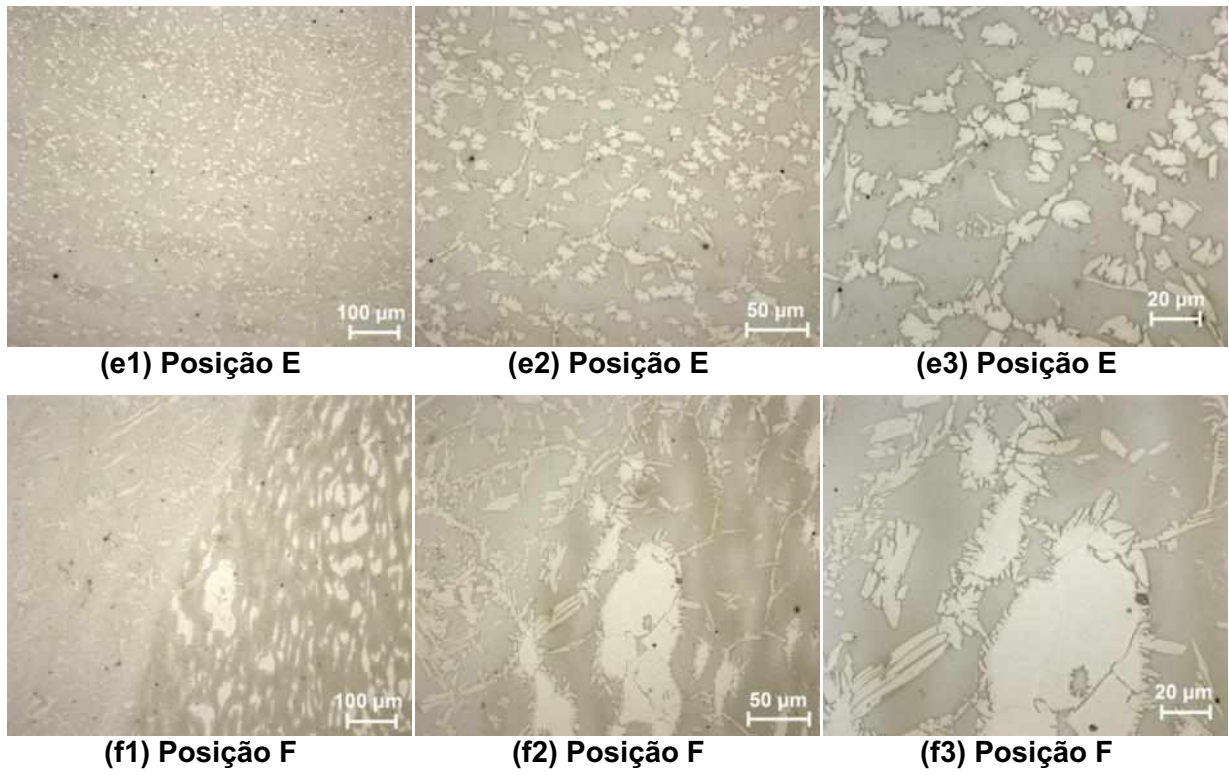
SENATORE, M.; FINZENTTO, L.; PEREA, E., **Estudo Comparativo entre os Aços Inoxidáveis Duplex e os Inoxidáveis AISI 304L/316L** Ouro Preto, MG 2007.

VASCONCELLOS, P.I.G.; ROSENTHAL, R.; PARANHOS, R.P.R. Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável duplex e superduplex na posição 5G. **Scielo: Scientific Eletronic Library Online**, São Paulo, v. 15, n.3, julho/setembro 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242010000300005](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242010000300005)>. Acesso em: 6 dez. 2017.

## APÊNDICE



**Figura A-1:** Fotomicrografias da junta soldada ( 30 kN / profundidade 16 mm). Imagens com índice 1, 2 e 3 realizadas com objetivas de 20x, 50x e 100x respectivamente



**Figura A-2:** Continuação.